

**RESPUESTA DE LA COMUNIDAD DE DIATOMEAS Y SUS RASGOS
BIOLÓGICOS A DIFERENTES ALTERACIONES ANTRÓPICAS EN
AMBIENTES LÓTICOS DEL PIEDEMONTE DE LA ORINOQUÍA COLOMBIANA**

MARCELA BUSTOS

**UNIVERSIDAD DE BOGOTÁ JORGE TADEO LOZANO
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERÍA
MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES
BOGOTÁ, D.C.
2018**

**RESPUESTA DE LA COMUNIDAD DE DIATOMEAS Y SUS RASGOS
BIOLÓGICOS A DIFERENTES ALTERACIONES ANTRÓPICAS EN
AMBIENTES LÓTICOS DEL PIEDEMONTE DE LA ORINOQUÍA COLOMBIANA**

MARCELA BUSTOS

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ciencias Ambientales**

Directora:

ÁNGELA MARÍA ZAPATA ANZOLA M.Sc

Codirector:

CARLOS ALBERTO RIVERA RONDÓN Ph.D

**UNIVERSIDAD DE BOGOTÁ JORGE TADEO LOZANO
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERÍA
MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES
BOGOTÁ, D.C.**

2018

Nota de aceptación:

Firma Jurado

Firma Jurado

AGRADECIMIENTOS

A mi directora, la profesora Ángela María Zapata, por su generosidad al brindarme la oportunidad de recurrir a su calidad profesional, por su invaluable tiempo y acertada asesoría durante la realización de este proyecto.

Al profesor Carlos Alberto Rivera, codirector del trabajo, por la oportunidad de servirme de su experiencia científica en la identificación de muestras de laboratorio, por su calidez y disposición.

A la secretaria de Educación Distrital y el fondo de formación avanzada de Docentes por el apoyo financiero para la realización de estudios de maestría.

A la Universidad Jorge Tadeo Lozano, al equipo directivo y docente de la Maestría en Ciencias Ambientales por aportar en mi formación académica y profesional.

Al Laboratorio de Limnología de la Pontificia Universidad Javeriana por permitirme disponer de los recursos físicos y humanos para la realización del proyecto.

A María Fernanda González por su colaboración en el diseño y desarrollo de la AVA.

A todos ustedes, familia, amigos, maestros y demás personas que aportaron en el proceso gracias por su apoyo, confianza y guía.

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|--|------------|
| 1. INTRODUCCIÓN | 10 |
| 2. MARCO TEÓRICO | 13 |
| 2.1. LOS SISTEMAS FLUVIALES | 13 |
| 2.1.1. <i>Funcionamiento de los Sistemas Fluviales</i> | 14 |
| 2.1.2. <i>Variaciones Temporales en los Sistemas Fluviales</i> | 16 |
| 2.2. COMUNIDAD PERIFÍTICA..... | 16 |
| 2.2.1. <i>Diatomeas del Perifiton</i> | 19 |
| 2.2.2. <i>Rasgos Biológicos de Diatomeas</i> | 20 |
| 3. ESTADO DEL ARTE | 23 |
| 4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 27 |
| 4.1. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN | 28 |
| 5. JUSTIFICACIÓN | 29 |
| 6. OBJETIVOS | 30 |
| 6.1. OBJETIVO GENERAL..... | 30 |
| 6.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 30 |
| 7. HIPÓTESIS | 31 |
| 8. METODOLOGÍA | 33 |
| 8.1. ÁREA DE ESTUDIO..... | 33 |
| 8.2. DISEÑO MUESTRAL | 36 |
| 8.3. MATERIALES Y MÉTODOS..... | 37 |
| 8.3.1. <i>Medición de Variables Físicoquímicas del Agua</i> | 37 |
| 8.3.2. <i>Recolección de muestras de diatomeas</i> | 38 |
| 8.3.3. <i>Limpieza y montajes de diatomeas</i> | 38 |
| 8.3.4. <i>Análisis cualitativo</i> | 38 |
| 8.3.5. <i>Análisis de datos</i> | 41 |
| 9. RESULTADOS | 43 |
| 9.1. VARIABLES AMBIENTALES DE LAS CORRIENTES | 43 |
| 9.2. COMPOSICIÓN DE LA COMUNIDAD DE DIATOMEAS..... | 48 |
| 9.2.1. <i>Composición de la comunidad de diatomeas por alteración y periodo climático</i> | 52 |
| 9.2.2. <i>Diversidad ecológica de la comunidad de diatomeas</i> | 53 |
| 9.3. <i>Relaciones entre la comunidad de diatomeas y las variables físicas y químicas</i> | 56 |
| 9.4. RASGOS ECOLÓGICOS DE DIATOMEAS..... | 63 |
| 9.4.1. <i>Diversidad de rasgos biológicos</i> | 67 |
| 9.4.2. <i>Relaciones entre los rasgos biológicos de diatomeas y las variables físicas y químicas</i> | 71 |
| 9.5. SÍNTESIS DE RESULTADOS | 75 |
| 10. DISCUSIÓN | 76 |
| 10.1. PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS DE LAS CORRIENTES DEL MUNICIPIO DE TAURAMENA | 76 |
| 10.2. COMPOSICIÓN DE LA COMUNIDAD DE DIATOMEAS..... | 79 |
| 10.3. RESPUESTA DE LA COMUNIDAD ANTE LAS ALTERACIONES Y LOS PERIODOS HIDROLÓGICOS | 82 |
| 10.4. RASGOS BIOLÓGICOS DE DIATOMEAS | 85 |
| 11. CONCLUSIONES | 89 |
| 12. BIBLIOGRAFÍA | 91 |
| 13. ANEXOS | 101 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Localización de los sitios de muestreo en el tramo de referencia (R) y de alteración (A)..... | 36 |
| Tabla 2. Asignación de los taxones a métricas biológicas (formas de vida) | 39 |
| Tabla 3. Asignación de Taxa a los tres gremios ecológicos | 40 |
| Tabla 4. Valores promedio de las variables abióticas en cada corriente | 43 |
| Tabla 5. Resumen estadístico del ACC para alteración por ganadería | 57 |
| Tabla 6. Resumen estadístico del ACC para alteración por extracción de caudal..... | 59 |
| Tabla 7. Resumen estadístico del ACC para alteración por extracción de material..... | 61 |
| Tabla 8. Promedio del índice de diversidad de Shannon (H') para los rasgos biológicos por periodo climático y punto en cada tipo de alteración. | 68 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Tramo de un río que muestra muchos de los elementos y procesos que vinculan los arroyos y áreas ribereñas. | 15 |
| Figura 2. Representación de las formas de crecimiento en el ensamblaje del perifiton. | 18 |
| Figura 3. Resumen del concepto de la relación de la perturbación recursos-herbivoría en el desarrollo de las algas en los arroyos. | 19 |
| Figura 4. Ubicación del área de estudio. | 33 |
| Figura 5. Precipitación media mensual en Tauramena durante el tiempo de estudio (IDEAM) | 34 |
| Figura 6. Análisis de Componentes Principales (ACP) de las variables fisicoquímicas para todos los sitios de muestreo. | 46 |
| Figura 7. ACP de las variables fisicoquímicas para los sitios de muestreo por alteración | 48 |
| Figura 8. Gráficas de abundancia de cada familia en cada sitio de muestreo por tipo de alteración. | 50 |
| Figura 9. Gráfica de abundancia relativa de especie por cada tipo de alteración. | 51 |
| Figura 10. Gráficas de similitud de Jaccard de todos los puntos de muestreo. | 53 |
| Figura 11. Gráficas de riqueza, dominancia (1/D), diversidad (H') y equidad (J') de morfoespecies en las quebradas con ganadería | 54 |
| Figura 12. Gráficas de riqueza, dominancia (1/D), diversidad (H') y equidad (J') de morfoespecies en las quebradas con extracción de caudal. | 55 |
| Figura 13. Gráficas de riqueza, dominancia (1/D), diversidad (H') y equidad (J') de morfoespecies en las quebradas con extracción de material. | 56 |
| Figura 14. Gráfica del Análisis de Correspondencia Canónica para las quebradas con alteración por ganadería. | 58 |
| Figura 15. Gráfica del Análisis de Correspondencia Canónica para las quebradas con alteración por extracción de caudal. | 60 |
| Figura 16. Gráfica del Análisis de Correspondencia Canónica para los ríos con alteración por extracción de material. | 63 |
| Figura 17. Proporción de rasgos biológicos en las quebradas con alteración con ganadería. | 64 |
| Figura 18. Proporción de rasgos biológicos en las quebradas con extracción de caudal. | 65 |
| Figura 19. Proporción de rasgos biológicos en los ríos con extracción de material. | 67 |
| Figura 20. Gráficas de similitud de Bray-Curtis entre los rasgos biológicos de todas las corrientes por tipo de alteración | 70 |
| Figura 21. Gráfica del Análisis Redundancia para los gremios ecológicos y las formas de crecimiento. | 72 |
| Figura 22. Síntesis de resultados. | 75 |

RESUMEN

En nueve corrientes del piedemonte de la Orinoquía colombiana se analizó el efecto de la estacionalidad climática (lluvia - sequía) y de alteraciones antrópicas (ganadería, extracción de caudal y material de lecho), sobre la composición, estructura y rasgos biológicos del ensamblaje de diatomeas. A partir del análisis de las características físicas, químicas e hidrológicas se estableció que las corrientes de menor orden o quebradas presentaron pH ácido, nutrientes y turbiedades bajas, mientras que los ríos de mayor orden tuvieron mayor carga de sólidos totales, conductividad y pH neutro. La estacionalidad determinó cambios en la composición química e hidrológica en todos los cuerpos de agua. Sin embargo, las alteraciones no determinaron cambios importantes en la caracterización física y química. La identificación taxonómica y el conteo de diatomeas se realizó a partir de láminas permanentes. La comunidad de diatomeas presentó 147 morfotipos, en las quebradas las familias representativas fueron Eunotiaceae y Diadesmidaceae, en los ríos fueron Cymbellaceae, Naviculaceae y Sellaphoraceae. Las diatomeas de las quebradas respondieron a las características fisicoquímicas del hábitat (velocidad de la corriente, materia orgánica y sulfatos) mientras que en los ríos a los nutrientes (fósforo, sílice) y pH. En la mayor parte de las corrientes la riqueza fue mayor en el periodo de sequía y no se encontraron diferencias significativas en los puntos con alteración. Los rasgos biológicos y las comunidades están en consonancia con las variables ambientales y pone de manifiesto la resiliencia de estos ecosistemas y su rápida recuperación a eventos antrópicos de baja intensidad.

Palabras clave: diatomeas, ecosistemas lóticos, estacionalidad, alteraciones antrópicas, rasgos biológicos

ABSTRACT

In nine streams of the foothills of the Colombian Orinoquía, the effect of climatic seasonality (rain - drought) and anthropogenic alterations (livestock, withdrawal water and hard rock mining) on the composition, structure and biological features of the diatom assembly was analyzed. From the analysis of the physical, chemical and hydrological characteristics it was established that the lower order streams had acid pH, nutrients and low turbidity, while the higher order rivers had higher total solids load, conductivity and neutral pH. Seasonality determined changes in the chemical and hydrological composition in all bodies of water. However, the alterations did not determine important changes in the physical and chemical characterization. Taxonomic identification and diatom counts were made from permanent plates. The community of diatoms presented 147 morphotypes, in the streams the representative families were Eunotiaceae and Diadesmidaceae, in the rivers were Cymbellaceae, Naviculaceae and Sellaphoraceae. The diatoms of the streams responded to the physicochemical characteristics of the habitat (current velocity, organic matter and sulphates) while those in rivers responded to nutrients (phosphorus, silica) and pH. In most of the currents, the richness was higher in the period of drought and no significant differences were found in the points with alteration. Biological traits and communities are in line with environmental variables and show the resilience of these ecosystems and their rapid recovery to anthropic events of low intensity.

Key Words: diatoms, lotic ecosystems, seasonality, anthropic alterations, biological traits

1. INTRODUCCIÓN

Las actividades humanas son una de las principales causas para el deterioro de los ecosistemas, la gran demanda de recursos para satisfacer las necesidades hace que se modifique el paisaje para dar paso a tierras agrícolas, ganadería, urbanización, construcción de vías y explotación de recursos, que resultan en la pérdida de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos. Estas actividades alteran los ambientes lóticos y la biota acuática, debido a la degradación y pérdida de hábitats, cambio en el régimen de flujo, la calidad del agua, fuentes de energía e interacciones bióticas.

Las alteraciones en estos ecosistemas hacen que las comunidades acuáticas se reajusten constantemente modificando su estructura, ya sea por cambios en el número de individuos de las especies presentes o por reemplazo de unas especies por otras más tolerantes, el conocimiento de la influencia de esas variaciones sobre las comunidades facilita la determinación del grado de afectación que están teniendo los sistemas fluviales. Las algas del perifiton por ser el grupo autótrofo dominante en los ecosistemas lóticos, constituye la base para los procesos de transferencia de energía y materia a través de las cadenas tróficas por lo que su papel es fundamental para determinar los patrones de respuesta a las perturbaciones naturales o antrópicas.

Dentro de la comunidad de algas del perifiton, las diatomeas son uno de los grupos dominantes por abundancia y distribución. Son ampliamente conocidas por su uso como bioindicadoras de la calidad del agua, por tener ciclos de vida cortos responden rápidamente a variaciones fisicoquímicas, se han desarrollado varios índices bióticos que se basan en la sensibilidad de cada taxón a las alteraciones ambientales y su abundancia relativa dentro del ensamblaje. Sin embargo, estos índices presentan algunas dificultades debido a la gran diversidad de especies, a

la complejidad de la identificación taxonómica y el desconocimiento de sus rangos de tolerancia.

A lo largo de los gradientes ambientales, las diatomeas presentan cambios dentro de su fisionomía producto de su adaptación a alteraciones como el enriquecimiento de nutrientes y las perturbaciones, que permiten agruparlas por rasgos biológicos, dados por el tamaño y la forma de crecimiento, lo que facilita su uso para determinar el estado ecológico de las corrientes, pues reduce la especificidad de tolerancia de cada taxón a un pequeño número de grupos con una sensibilidad específica a ciertas alteraciones.

El presente trabajo busca determinar la respuesta la comunidad de diatomeas y sus rasgos biológicos en seis quebradas y tres ríos del piedemonte de la Orinoquía que presentan algún tipo de alteración antrópica: ganadería, extracción de agua o material del lecho durante dos periodos hidrológicos: alta y baja precipitación. La información suministrada permitirá ampliar el conocimiento sobre la diversidad de la diatomoflora en zonas tropicales, así como las características ambientales de los sistemas acuáticos estudiados, conformando una línea base para el desarrollo de estudios posteriores de bioindicación de sistemas lóticos de esta región.

Este proyecto se encuentra enmarcado dentro de dos macroproyectos llevados a cabo por la Pontificia Universidad Javeriana titulados: Efecto de la alteración del caudal sobre la comunidad de peces en quebradas de bajo orden en la Orinoquía Colombiana. (ID propuesta 4595; ID proyecto 4382) y Diversidad y estacionalidad en comunidades biológicas en quebradas bajo diferente grado de alteración en el municipio de Tauramena, Orinoquía colombiana. (ID propuesta 4742; ID proyecto 4540). El objetivo principal de estos proyectos fue determinar los efectos de las alteraciones antrópicas y la estacionalidad sobre diferentes comunidades

biológicas allí presentes. A partir del material recolectado y almacenado durante la ejecución de dichos proyectos se desarrolló la presente investigación.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. LOS SISTEMAS FLUVIALES

Los sistemas fluviales, también llamados lóticos encierran todos los ecosistemas acuáticos de corrientes de agua: arroyos, quebradas y ríos, donde todo el cuerpo de agua se mueve en una dirección definida en un movimiento continuo y rápido de sus aguas, son sistemas abiertos con gran heterogeneidad temporal y espacial: longitudinal, lateral y vertical (Ward, 1989). Se caracterizan por las interacciones entre factores geomorfológicos (pendiente, ancho del cauce, tipo de sustrato), físicos (temperatura del agua, velocidad de la corriente, intensidad luminosa), químicos (concentración de oxígeno y nutrientes) y biológicos (producción primaria, vegetación riparia, herbivoría) que se dan a lo largo del eje longitudinal cabecera-desembocadura y que alcanzan un mayor grado de complejidad aguas abajo (Wehr & Descy, 1998).

Las características de los ecosistemas fluviales, además de ser determinadas por el gradiente longitudinal, están siendo influenciadas por las actividades humanas que se desarrollan en áreas terrestres adyacentes y que modifican las propiedades fisicoquímicas (Allan, 2004). La medición de estas variables permite el conocimiento de las condiciones de la calidad del agua de manera instantánea, sin embargo no da cuenta de los cambios en un tiempo mayor.

Las comunidades algales que se desarrollan en los ecosistemas acuáticos sostienen relaciones complejas con las condiciones medioambientales, por lo tanto sufren modificaciones debido a las alteraciones naturales y antrópicas (Lake, 2000; Biggs & Smith, 2002; Passy & Blanchet, 2007). Los cambios de las condiciones del medio, atribuibles a variaciones naturales o antropogénicas, hacen que las comunidades biológicas deban ajustarse modificando su estructura, por ejemplo con el número de individuos de cada especie y sustituyendo algunas

especies por otras, de acuerdo a los intervalos de tolerancia que presentan para determinados factores ambientales (Lobo & Carvalho, 1988), con lo que se puede obtener un mejor análisis de la calidad del agua en estos ecosistemas de forma continua.

2.1.1. Funcionamiento de los Sistemas Fluviales

Para el estudio de la ecología y gestión de la cuenca y sus ríos Vannote *et al.*, (1980) describieron el concepto teórico del río continuo “*The River Continuum Concept*” (RCC). El concepto describe la idea de que los atributos geomorfológicos e hidrológicos del flujo de agua forman un patrón fundamental a lo largo de todo el perfil longitudinal, desde el nacimiento hasta la desembocadura, que determina la estructura de la comunidad y el funcionamiento del ecosistema, con lo que proporciona una base sobre la cual se pueden predecir los cambios biológicos, físicos y químicos a lo largo de un sistema fluvial (Figura 1).

El RCC integra el orden de la corriente, las fuentes de energía (materia orgánica), las redes alimentarias (macroinvertebrados bentónicos) y en menor medida los nutrientes dentro del modelo longitudinal de los ecosistemas fluviales. De manera que en sistemas lóticos la estructura de las comunidades en su cabecera (ríos de orden 1-3) está en gran parte determinada por la vegetación de ribera, que añade material orgánico al canal (material alóctono) y sombrea el fondo del río, limitando la producción autótrofa, mientras que para corrientes del orden de 4-6 se encuentra mayor cantidad de organismos autótrofos, ya que los cauces son más anchos, menos sombreados que reciben gran cantidad de sedimentos arrastrados desde aguas arriba, con lo que sintetiza materia orgánica (material autóctono) (Allan & Castillo, 2007). La abundancia relativa de estos tipos de materia orgánica desempeña un papel clave en la estructuración de la comunidad biótica de la corriente e influye en la dinámica de nutrientes del sistema (Vannote *et al.*, 1980). Modificaciones del RCC para ajustar algunos puntos débiles y hacerlo más realista

fueron realizados posteriormente al integrarlo con otros conceptos como la influencia de la zona riparia (Cummins *et al.*, 1989) y el concepto-pulso de inundación (Junk *et al.*, 1999).

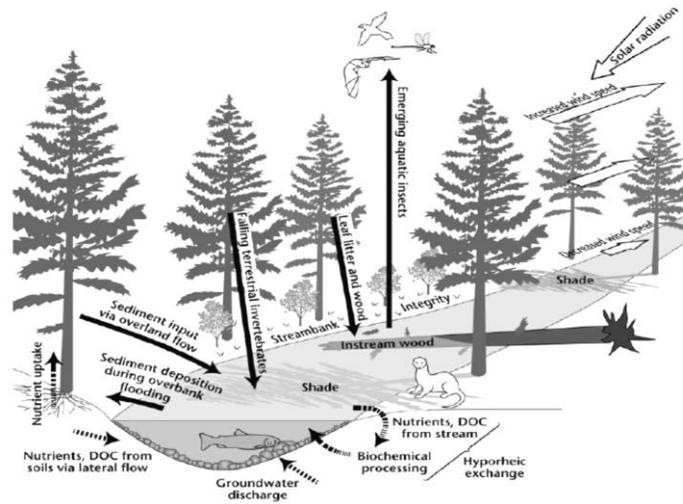


Figura 1. Tramo de un río que muestra muchos de los elementos y procesos que vinculan los arroyos y áreas ribereñas (Leinberger, 2010).

La distribución de los organismos dentro en los ecosistemas loticos también se puede explicar a través de la hipótesis del disturbio intermedio (HDI) que propone que diferentes grados o magnitudes de un disturbio tienen efectos sobre la diversidad de especies (Connell, 1978). En los ríos, la perturbación o el disturbio no solo se relacionan con descarga de agua, también con el efecto de las actividades antrópicas. De acuerdo con esta hipótesis, a bajas frecuencias de perturbación la estrategia está dada por el dominio de una especie más competitiva que desplazará a otras buscando el equilibrio con baja diversidad y en condiciones de alta frecuencia de disturbio desplazará competidores superiores y solo permanecerán las especies que pueden resistirlo, mientras que en niveles intermedios de disturbio ambos tipos de especies permanecerán y el equilibrio por competencia no tendrá lugar dando como resultado mayor diversidad (Connell, 1978; Collins, *et al.*, 1995).

2.1.2. Variaciones Temporales en los Sistemas Fluviales

La variabilidad estacional habitual en el caudal de un río se denomina régimen hidrológico. Las variaciones temporales de la descarga de los ríos se pueden clasificar en dos grupos: variaciones interanuales y variaciones anuales (estacionales). Los cambios climáticos y los fenómenos climáticos, como el Niño, gobiernan las variaciones interanuales de los caudales de muchos ríos y sistemas fluviales (Elosegi & Sabater, 2009), mientras que las variaciones anuales dependen altamente del clima local, en el trópico por ejemplo, se presenta una estacionalidad climática que se debe principalmente a períodos de lluvia y sequía de cada región (Dudgeon, 2008).

El régimen hidrológico se caracteriza por ciclos y fluctuaciones de diverso orden donde los componentes bióticos, físicos y los procesos metabólicos del ecosistema interactúan naturalmente para ajustarse a situaciones normales de disminución o aumento de caudal. Pero esta situación puede alterar severamente las comunidades acuáticas, causando la desaparición de muchos individuos de cada población, modificando los procesos y patrones dentro de las comunidades (Cooper *et al.*, 1998). Los cambios en el flujo y la velocidad de la corriente, considerados como disturbios naturales, desencadenan cambios en la biota e influyen sobre la adhesión algal al sustrato, la productividad y la estructura de la comunidad (Horner & Welch, 1981). Para las algas perifíticas este factor produce complejos modelos espaciales y temporales, su efecto es antagónico al ser un factor positivo de estimulación para la toma de nutrientes y negativo por el desprendimiento y estrés que genera (Stevenson, 1996).

2.2. COMUNIDAD PERIFÍTICA

Basados en el reconocimiento de la complejidad estructural y el estrecho acoplamiento de muchos procesos heterotróficos y autotróficos dentro de las

comunidades acuáticas, la definición más aceptada del perifiton es la otorgada por Wetzel (1983), quien la define como una comunidad compleja de microbiota (algas, bacterias, hongos, animales y detritus orgánico e inorgánico) que se une a sustratos que pueden ser orgánicos e inorgánicos. Aunque la definición puede ser muy amplia, la mayoría de los estudios sobre perifiton se realizan en algas perifíticas debido a su importante papel en los procesos de flujo de energía en los ecosistemas dulceacuícolas.

Las algas desempeñan roles muy importantes en hábitats de agua dulce: mantienen las redes tróficas pues son productores primarios, proveen material autóctono a la corriente, se comportan como moduladores químicos ya que transforman muchas sustancias inorgánicas en formas orgánicas, estabilizan sustratos y también pueden servir como hábitats para muchos otros organismos (Stevenson, 1996). Se pueden clasificar según el tipo de sustrato donde están adheridas, las algas que colonizan rocas se denominan *epilíton* y este grupo se caracteriza por especies con secreción mucilaginosa, con células basales o pedúnculos que disminuyen la posibilidad de ser arrastradas por la corriente. Algunas especies de algas están en contacto con el sustrato a lo largo de toda la pared celular, otras forman colonias y filamentos. Esta forma de crecimiento contrasta con las formas erectas en donde solo una célula o mucilago basal está en contacto con el sustrato (Allan & Castillo, 2007; Roldan & Ramírez, 2008) (Figura 2).

La comunidad algal en ambientes de agua dulce está dominada principalmente por cianobacterias (cianofitas), algas verdes (clorofitas), diatomeas (bacilariofitas) y las algas rojas (rodofitas) (Stevenson *et al.*, 1996). Cuando las algas filamentosas son escasas, las diatomeas pasan a ser una parte importante del número de células y especies en las comunidades de algas perifíticas y proporcionan una parte significativa de la producción primaria e incluso de la biomasa (Biggs, 1996).

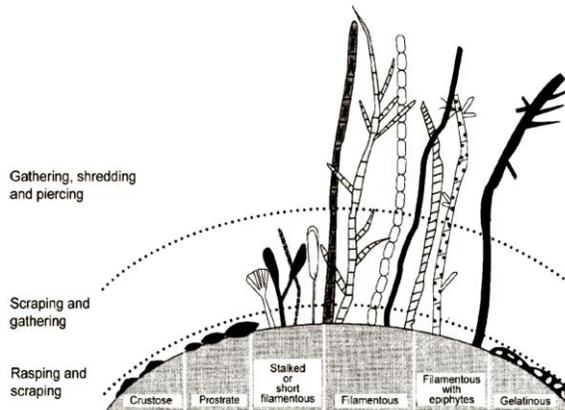


Figura 2. Representación de las formas de crecimiento en el ensamblaje del perifiton (reproducida de Steinman, 1996 en Allan & Castillo, 2007).

Las comunidades de algas del perifiton están determinadas por muchos factores abióticos que influyen en su biomasa, diversidad y composición. En las quebradas y ríos los factores inmediatos que pueden impactar las algas incluyen: la luz, la temperatura, la corriente, el sustrato, el pulso de inundación, la química del agua y la herbivoría (Allan & Castillo, 2007). Otros factores vinculados a la zona de captación de la región como: la topografía, la geología, la utilización del suelo, la vegetación y el clima se cree que afectan estas variables próximas y que por lo tanto regulan la acumulación y pérdida de biomasa algal (Biggs, 1996). El nivel de recursos (luz y nutrientes), interactuando con la temperatura, influye en las tasas de metabolismo y en el crecimiento, mientras que el disturbio (inestabilidad del sustrato, alta velocidad de la corriente y la presión por herbivoría) elimina muchos individuos produciendo la pérdida de biomasa algal (Allan y Castillo, 2007).

De esta forma, los organismos han desarrollado una serie de estrategias relacionadas con su morfología para captar mejor los recursos (formas erectas, pedunculadas, o filamentosas) o contrarrestar los efectos del disturbio (formas fuertemente adheridas al sustrato, con bajo crecimiento etc.). La Figura 3 muestra el equilibrio relativo de los procesos de pérdida y acumulación de biomasa,

además se muestra la fisonomía de la comunidad puede dominar cada extremo del gradiente.

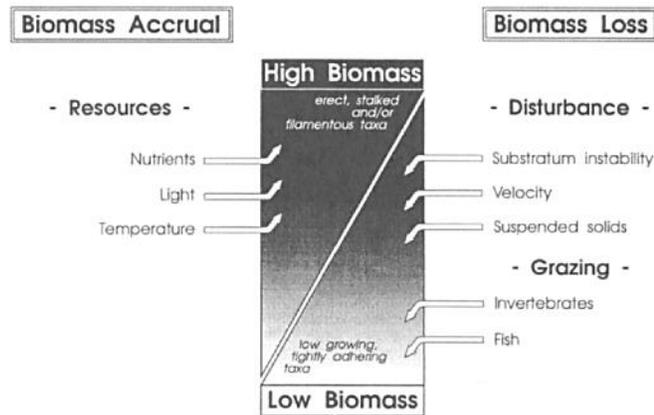


Figura 3. Resumen del concepto de la relación de la perturbación recursos-herbivoría en el desarrollo de las algas en los arroyos (Biggs, 1996).

2.2.1. Diatomeas del perifiton

Las diatomeas son microorganismos unicelulares, autótrofos y eucariotas con forma de vida libre, aunque también existen individuos filamentosos o coloniales envueltos por una capa de mucílago (Wetzel, 1983), su tamaño va desde ~ 2 µm a 500 µm, pero algunas cadenas pueden tener varios milímetros de longitud. Pertenecen a la clase Bacillariophyceae del phylum Bacillariophyta.

La característica más distintiva que presentan las diatomeas se encuentra en su capa extracelular llamada frústula que presenta diferentes tamaños, formas y tipos de ornamentación como poros, rafe y espinas. La frústula consiste en dos valvas de dióxido de silicio (SiO₂) que se superponen y encierran el protoplasma vegetal, la valva superior se conoce como epiteca y la inferior como hipoteca (Round *et al.*, 1990). Las diatomeas pueden presentar dos formas básicas dependiendo de su simetría: céntrica (simetría radial), comunes en el plancton y pennadas (elipse delgada con simetría bilateral) de mayor presencia en el bentos. Se multiplican

rápidamente, manteniendo una población dinámica de tamaño dependiendo de las condiciones ambientales reinantes.

Las diatomeas se pueden hallar en ambientes de agua dulce y marinos, se pueden encontrar a cualquier latitud y longitud, lo que sugiere que la ubicación geográfica no es el factor determinante en la distribución de especies de diatomeas y la composición de las comunidades, sino más bien son las variables ambientales específicas de un sitio específico las que determinan esta distribución (Bere & Tundisi, 2010).

La estructura de la comunidad de diatomeas ha mostrado ser el resultado de interacciones complejas que se dan entre múltiples factores medioambientales entre los que se encuentran algunos parámetros fisicoquímicos del agua como el pH, los nutrientes, la temperatura, la velocidad de la corriente, además, la disponibilidad de luz, el régimen climático y el tipo de sustrato (Peterson & Stevenson, 1989, Biggs, 1990, Pan *et al.*, 1996, Potatova & Charles, 2003, Passy, 2001). Como resultado, las diatomeas se utilizan ampliamente en la evaluación ambiental y el monitoreo de la calidad del agua en los ecosistemas lóticos.

2.2.2. Rasgos Biológicos de Diatomeas

Los rasgos biológicos son atributos expresados por los organismos que se han seleccionado de las especies (por ejemplo: tamaño, forma de crecimiento, morfología, ciclos de vida o comportamiento) y que proporcionan indicaciones sencillas sobre cómo los organismos responden a las limitaciones ambientales. La utilización de los rasgos brinda un enfoque comunitario a la evaluación del funcionamiento o el estado de un ecosistema acuático, y la variabilidad funcional pues definen las especies en términos de sus funciones ecológicas al capturar aspectos clave de la funcionalidad de los organismos en el sistema (Litchman & Klausmeier, 2008).

Por ello, la influencia de las variables medioambientales y de los procesos antrópicos sobre la comunidad de diatomeas se puede evaluar tanto a través de las unidades taxonómicas o parámetros de abundancia, como por los rasgos biológicos, pues también se ven afectados por los regímenes de luz, disponibilidad de nutrientes y diferentes intervenciones o factores de estrés que se estén dando dentro la corriente de agua (Passy, 2007a). Los rasgos biológicos más utilizados para las diatomeas son las clases de tamaño de las células, la forma de vida, y los gremios ecológicos (ecological guilds) (Berthon *et al.*, 2011, Rimet & Bouchez, 2012).

El tamaño de célula es considerado como un “rasgo principal” que impone limitaciones importantes en muchas de las características clave del organismo y las interacciones bióticas, en las diatomeas del perifiton se encuentra relacionado con la disponibilidad de los recursos (Finkel *et al.*, 2009). La relación riqueza de especies y tamaño de la célula de las diatomeas se encuentra en la optimización para la captación de nutrientes, las especies más pequeñas son limitadas por su capacidad para adquirir los recursos, mientras que las especies más grandes, son limitadas por sus capacidad de dispersión (Passy, 2007b).

La forma de vida es un rasgo que se determina dependiendo de las diversas estrategias que utilizan las diatomeas para resistir presiones ambientales como el pastoreo, la perturbación del flujo, y los recursos. La clasificación por formas de vida incluye: diatomeas bentónicas, planctónicas, móviles, coloniales, las que viven en una mucosa tubular (formadora de tubo), pedunculadas y pioneras (Rimet & Bouchez, 2011). La forma de vida en mucosa tubular es también llamada agregados tubulares, es un tipo de forma de vida colonial donde las diatomeas viven en una sustancia mucosa protectora en la que puedan moverse libremente. Las diatomeas pioneras son capaces de colonizar sustratos desnudos más rápido

que otras especies, probablemente porque son generalmente de pequeño tamaño (Berthon *et al.*, 2011).

La diversidad de diatomeas también se puede asignar a gremios ecológicos, que consisten en grupos de taxones que viven en el mismo entorno, pero que se adaptan de diferentes maneras a los factores abióticos. Los gremios ecológicos reúnen especies que pueden o no pertenecer al mismo clado taxonómico pero que presentan una misma forma de crecimiento o de vida que se asocia con diferentes niveles de tolerancia a las características del entorno. La importancia del uso de los gremios ecológicos es que los vínculos establecidos con los factores ambientales pueden ser más fuertes que los establecidos con una sola especie (Rimet & Bouchez, 2012).

Passy, (2007a) agrupó las diatomeas en tres gremios ecológicos dependiendo de la forma de crecimiento y su respuesta a distintos cambios del entorno. El primer grupo, las diatomeas de bajo perfil consiste en especies de talla baja, que crecen en la capa límite de la biopelícula, incluye especies con forma de crecimiento postrada, adnada, erectas pequeñas, céntricas solitarias y especies de movimiento lento. El segundo grupo, las diatomeas de alto perfil son especies de mayor tamaño o talla alta que pueden crecer más allá de la capa límite de la biopelícula, incluye las formas de crecimiento erecta, filamentosa, ramificada, pedunculada, formadora de tubo y cadenas y las de forma céntrica colonial. El tercer grupo son las diatomeas móviles, se caracterizan porque se pueden desplazar por el sustrato.

3. ESTADO DEL ARTE

Los estudios realizados en Colombia sobre diatomeas en ríos registran la influencia de las variables ambientales sobre la estructura de la comunidad. En el trabajo realizado por Díaz & Rivera (2004), mostraron que las diatomeas perifíticas en ríos de la cuenca alta y media del río Bogotá, están determinadas principalmente por las variables físicas (32,3%) y químicas (56,4%) con respecto a las hidrológicas (11,3%). Otros estudios en sistemas de montaña encontraron la influencia de las variables hidrológicas (caudal) y químicas sobre la distribución, diversidad y la fisionomía de diatomeas bénticas (Zapata & Donato, 2005; Ramírez & Plata, 2008; Rivera & Donato, 2008; Pedraza & Donato, 2011).

Para la región de la Orinoquía los estudios se han direccionado hacia la descripción de las características limnológicas de cuerpos de agua lóticos y lénticos y su relación con las condiciones hídricas, definidas por la estacionalidad climática. Rivera *et al.*, (2010) encontró que el régimen hidrológico tuvo un impacto importante sobre los ecosistemas acuáticos, durante aguas bajas los grupos dominantes de algas fueron Bacillariophyceae y Zygnemaphyceae y la mayor parte de los sistemas presentaron pH ácido, una baja concentración de iones y nutrientes. Durante el periodo de aguas altas, aumentó la transparencia, la concentración de algunos nutrientes y se presentó una reducción en la conductividad. Resultados similares en las variables ambientales fueron hallados en el piedemonte llanero, en un trabajo realizado por Medina *et al.* (2013) en el morichal y la quebrada La Vieja que clasificaron los cuerpos de agua como oligotróficos y con una posible concentración de sustancias húmicas. La composición de algas en los diferentes sustratos estuvo representada de igual forma por Zygnemaphyceae y Bacillariophyceae.

La respuesta de las diatomeas a diferentes alteraciones antrópicas no ha sido documentada en Colombia, los estudios encontrados son a nivel internacional.

Licursi & Gómez (2002, 2009) han realizado trabajos sobre los efectos de las perturbaciones antropogénicas sobre la taxocenosis de diatomeas bentónicas en sistemas lóticos pampeanos. En 2002 realizaron un estudio sobre tres arroyos con influencia de agricultura y ganadería, donde muestran las preferencias ecológicas de diatomeas bentónicas en relación con el pH, la conductividad, la contaminación orgánica, la eutrofización y sus espectros de tolerancia, donde más del 50% de las especies se presentaron en los sitios donde la conductividad fue menor de $600 \mu\text{S cm}^{-1}$ y más del 50% de las especies tenía preferencia a sitios con materia orgánica y contenido de nutrientes moderados.

En 2009, estos mismos autores estudiaron los efectos del dragado sobre las asociaciones de diatomeas bentónicas en una corriente de las planicies, para investigar si la respuesta de las asociaciones de diatomeas está también influenciada por la calidad del agua. Las modificaciones físicas y químicas en el hábitat de las diatomeas bentónicas produjeron cambios en la diversidad y abundancia de especies, que aumentaron después del dragado, disminuyendo al final del estudio. Las especies sensibles fueron sustituidas por especies más tolerantes. Los sólidos en suspensión, fósforo reactivo soluble y nitrógeno inorgánico disuelto fueron significativamente mayores en los períodos post-dragado.

En 185 ríos de Europa con planicie de inundación, establecieron la correlación entre las comunidades de diatomeas perifíticas, macrófitas, macroinvertebrados bénticos y peces con diferentes alteraciones y niveles de estrés. Se encontró una fuerte respuesta a la eutrofización y a gradientes de polución orgánica que reflejan una respuesta significativa a los cambios en el uso de la tierra (Hering *et al.*, 2006).

Tang *et al.* (2013), reportaron el efecto de la extracción de caudal en arroyos en Hong Kong, sobre el ensamblaje de algas epibentónicas, aguas arriba y aguas

abajo de la captación. La respuesta de las algas varió por estacionalidad y por rasgos morfológicos debido a los cambios en los parámetros hidrológicos y los nutrientes, o por el efecto combinado de ambas variables. Durante la estación seca las diatomeas postradas y adnadas fueron relativamente más abundantes, mientras que las pedunculadas y las móviles fueron más numerosas después de la captación de agua. Las diatomeas de bajo y alto perfil fueron sensibles a los cambios en los nutrientes. La condición de bajo flujo reveló una mayor diversidad y riqueza.

Los estudios sobre los rasgos funcionales de las diatomeas inician hacia 1992 con Molloy, quien realizó un trabajo en tres sistemas de drenaje del río Kentucky, donde mostró la relación entre las formas morfológicas de crecimiento de las diatomeas con el tamaño de la corriente y como las comunidades algales responden a una amplia variedad de gradientes medioambientales, por los cambios en la abundancia relativa de las especies. En este estudio diez rasgos de la forma de crecimiento de las diatomeas presentaron gran relación con la corriente. Taxones de especies adnadas, erectas y pedunculadas fueron asociados con ensamblajes en las cabeceras mientras que diatomeas céntricas y filamentosas aparecen con mayor frecuencia aguas abajo.

El uso de los gremios ecológicos de las diatomeas y los factores ambientales han sido documentados en los últimos años, Berthon *et al.* (2011) mostraron que la abundancia de algunos rasgos biológicos difieren significativamente entre diferentes niveles de contaminación orgánica. Los gremios han indicado que en periodos de baja disponibilidad de nutrientes dominaron las diatomeas de bajo perfil y durante enriquecimiento de nutrientes las de alto perfil, las diatomeas móviles mostraron especial sensibilidad a otros factores como la temperatura y la luz (Lange *et al.*, 2011; Stenger-Kovács *et al.*, 2013).

Rimet & Bouchez (2011) estudió el uso de rasgos biológicos para evaluar la contaminación por plaguicidas, en los canales contaminados la abundancia de las especies móviles, de bajo perfil y de mucosa tubular fue mayor, mientras que las de alto perfil mostraron una tendencia opuesta, probablemente por su forma, las algas pertenecientes a este gremio se encuentran más expuestas a los plaguicidas.

4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El municipio de Tauramena posee un gran potencial hídrico, representado en cuatro subcuencas, nueve microcuencas y numerosos drenajes directos que a través del río Meta desembocan en el río Orinoco. Las diversas actividades humanas en la región constituyen una amenaza para los ecosistemas de la cuenca ya que la economía de la región se basa en actividades agropecuarias y extractivas (Rippstein *et al.*, 2001; Correa *et al.*, 2005). Una parte de la población sustenta su economía prestando sus servicios a las empresas petroleras, mientras que la actividad ganadera en el piedemonte ocupa el segundo renglón en la economía. Los mayores impactos generados se dan por el cambio en la fisonomía natural de la región puesto que se pierde la cobertura vegetal para ampliar la frontera agrícola y ganadera, las zonas de nacimientos de agua y corrientes superficiales disminuyen el lecho y el caudal y se favorece la erosión del suelo lo que amenaza severamente las fuentes hídricas y la biodiversidad (Correa *et al.*, 2005).

La ganadería, la extracción de caudal y la extracción de material pétreo son actividades que se desarrollan en forma permanente en esta región, por el aumento demográfico y la presión del desarrollo económico es probable que se registre un incremento a mediano plazo de estas actividades que tienen un efecto directo sobre los recursos hídricos. El estudio del efecto de estas alteraciones sobre las quebradas y ríos constituye una herramienta valiosa para orientar el manejo y conservación de estos ecosistemas. Sin embargo, los efectos de las alteraciones antrópicas de baja intensidad podrían no ser identificables a simple vista, entonces es necesario establecer la respuesta de los organismos que allí se establecen a estos factores tensionantes.

Las diatomeas podrían ser organismos potenciales para comprender las consecuencias de estas actividades sobre el ambiente, puesto que responden

rápidamente ante cambios ambientales (Stevenson & Pan, 1999), existe una relación directa entre las características fisionómicas del hábitat y la composición y abundancia de las especies de diatomeas (Gordon *et al.*, 1992) y entre las características físicas y químicas del agua (Potapova & Charles, 2002, 2003). A partir de estas últimas se han desarrollado una gran cantidad de índices que pueden revelar el grado de contaminación o de eutrofización de un ecosistema (Srivastava *et al.*, 2016). Sin embargo, el uso de los índices tiene restricciones, como por ejemplo la correcta identificación taxonómica de las especies y el conocimiento de su autoecología, lo que en nuestro contexto tropical limita mucho su aplicación. Pues no tenemos información, ni registro de muchas de las especies. Sin embargo, otras aproximaciones como la estructura de la comunidad, los rasgos morfológicos, los gremios ecológicos han sido utilizados para indicar afectaciones antrópicas sobre los ecosistemas (Passy 2007a; Berthon *et al.*, 2011; Rimet & Bouchez 2012; Stenger-Kovács *et al.*, 2013).

En la Orinoquía el régimen de precipitación puede marcar condiciones muy contrastantes para los ecosistemas acuáticos (Rivera *et al.*, 2010), los efectos de las actividades antrópicas sobre los ecosistemas pueden cambiar según el patrón hidrológico, entonces una correcta valoración requiere adicionalmente de un análisis estacional.

4.1. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Cómo responde la composición y estructura de la comunidad de diatomeas y sus rasgos biológicos a diferentes alteraciones de origen antrópico en nueve ambientes lóticos del municipio de Tauramena, Casanare durante dos períodos hidrológicos?

5. JUSTIFICACIÓN

La región de la Orinoquía colombiana por presentar ambientes de montaña, selva y sabana cuenta con una gran variedad de recursos naturales renovables y no renovables que la convierte en un ecosistema único y estratégico para el país, su gran riqueza hídrica favorece el desarrollo de gran diversidad de fauna y flora, además es conocida por ser una de las zonas con mayores reservas de gas y petróleo del país, por lo que la industria petrolera ocupa un importante renglón dentro de la economía de la región. Debido a estas bondades es centro de actividad ganadera, minera, agrícola y piscícola, lo que ha conllevado a generar alteraciones en el paisaje por cambios en el uso del suelo.

Las actividades económicas relacionadas con la extracción del petróleo y la ganadería están afectando directamente sobre el recurso hídrico ya que estas demandan de la explotación de otros recursos naturales para su desarrollo. La extracción de materiales como piedra y agua de los ríos en forma excesiva está generando procesos de degradación en los lechos y cambio en la morfología de los ríos y el régimen del flujo. Debido a la capacidad de estructurarse dependiendo del gradiente de condiciones ambientales, las diatomeas son un grupo de algas que reflejan a través de su composición el estado ecológico de la corriente. La agrupación de los taxones de diatomeas por rasgos biológicos facilita y extiende aún más su uso para identificar perturbaciones físicas y limitación por nutrientes, sin embargo queda por conocer la respuesta de los rasgos biológicos ante otras alteraciones en ríos y quebradas tropicales.

Por lo tanto el objetivo principal de este proyecto fue determinar la respuesta de la comunidad de diatomeas y sus rasgos biológicos ante las diferentes alteraciones antrópicas como la actividad ganadera, extracción de caudal y material del lecho de los ríos en dos periodos hidrológicos. Los resultados de esta investigación permitirán aportar al conocimiento de la biodiversidad de estos ecosistemas y

proporcionar información suficiente para elaborar planes de gestión, prácticas y estrategias adecuadas para la región que garanticen el uso sostenible de sus recursos en el mediano y el largo plazo y la prestación de los servicios de los ecosistemas para el resto de la biota y por supuesto para la población humana.

6. OBJETIVOS

6.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la respuesta de la composición, estructura de la comunidad de diatomeas y sus rasgos biológicos a diferentes alteraciones antrópicas en nueve ambientes lóticos del municipio de Tauramena, Casanare durante dos períodos hidrológicos.

6.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar la flora diatomológica de los ríos y quebradas por tipo de alteración y por periodo hidrológico.
- Estimar la riqueza, diversidad, equidad y dominancia de la comunidad de diatomeas por taxón y por rasgos biológicos en los ríos y quebradas por tipo de alteración y por periodo hidrológico.
- Comparar los índices de diversidad de la comunidad de diatomeas y los rasgos biológicos del tramo de alteración con los tramos de referencia y los dos periodos hidrológicos.
- Relacionar la estructura y los rasgos funcionales de la comunidad de diatomeas con las condiciones fisicoquímicas del agua de los ríos y quebradas por periodo hidrológico.

7. HIPÓTESIS

H₁: Alteraciones antrópicas en las corrientes junto con el régimen estacional producen cambios en las variables físicas y químicas del agua por lo tanto modifican la estructura y composición de la comunidad de diatomeas.

P₁: Si las alteraciones antrópicas como: ganadería, extracción de caudal, extracción de material pétreo de los lechos de los ríos producen cambios en los nutrientes, sedimentos, velocidad de la corriente entonces la composición y estructura de la comunidad de diatomeas cambiará puesto que las comunidades biológicas se establecen en consonancia con las variables ambientales, el ensamblaje de diatomeas y su organización estarán influenciados por las características del agua (Veraart *et al.*, 2008).

H₂: Los cambios estacionales en la hidrología de las corrientes producen cambios en los rasgos biológicos de la comunidad de diatomeas.

P₁: Si el régimen de precipitación produce cambios en el caudal y la velocidad de la corriente entonces durante la época de lluvias se espera encontrar dominio de diatomeas de bajo perfil (adnadas) dada su capacidad de resistencia a la turbulencia del agua (Passy, 2007a). Por otra parte, se espera una disminución proporcional en esta época de las diatomeas móviles y de alto perfil (erectas y pedunculadas) debido a sus débiles mecanismos de fijación al sustrato que les confiere baja resistencia al arrastre, estas serán más abundantes en sequía por su mejor habilidad para captar luz y nutrientes (Stenger-Kovács *et al.*, 2013).

H₃: Los cambios en la química del agua debido a alteraciones antrópicas en las corrientes producen cambios en los rasgos biológicos de las diatomeas.

P₁: Si la actividad ganadera, la extracción de caudal y la extracción de material alteran la disponibilidad de nutrientes (nitrógeno y fósforo), entonces dominarán diatomeas del gremio de alto perfil y móvil puesto que estos grupos toleran ambientes con enriquecimiento de nutrientes (Passy, 2007a).

P₂: Bajo la condición de extracción de caudal se espera encontrar una reducción en la velocidad de corriente entonces predominarán diatomeas del gremio de alto perfil y móviles dado un menor estrés físico (Passy, 2007a).

P₃: La intervención por extracción de materiales del lecho de los ríos puede estar generando un aumento en los sólidos suspendidos con la disminución en la disponibilidad de luz, por lo tanto se favorecen las diatomeas de alto perfil junto con las diatomeas móviles ya que tienen mayor facilidad en el acceso a este recurso (Passy, 2007a).

8. METODOLOGÍA

8.1. ÁREA DE ESTUDIO

En el municipio de Tauramena (Casanare) se seleccionaron tres ríos y seis quebradas que hacen parte de la cuenca del río Cusiana, en la zona conocida como piedemonte. La cuenca del río Cusiana tiene una extensión aproximada es de 506.254 Ha. El 87% del territorio de la cuenca (439.967.2 Ha) se extiende sobre el departamento de Casanare, el 13% restante del territorio recorre el departamento de Boyacá, (65.830 Ha). Alberga una corriente principal de 271 km de longitud que transcurre sobre un amplio gradiente altitudinal, con la cota mayor a los 3.800 m y la menor a los 150 m., altura a la cual entrega sus aguas al río Meta (Corpoboyacá, 2013) (Figura 4).

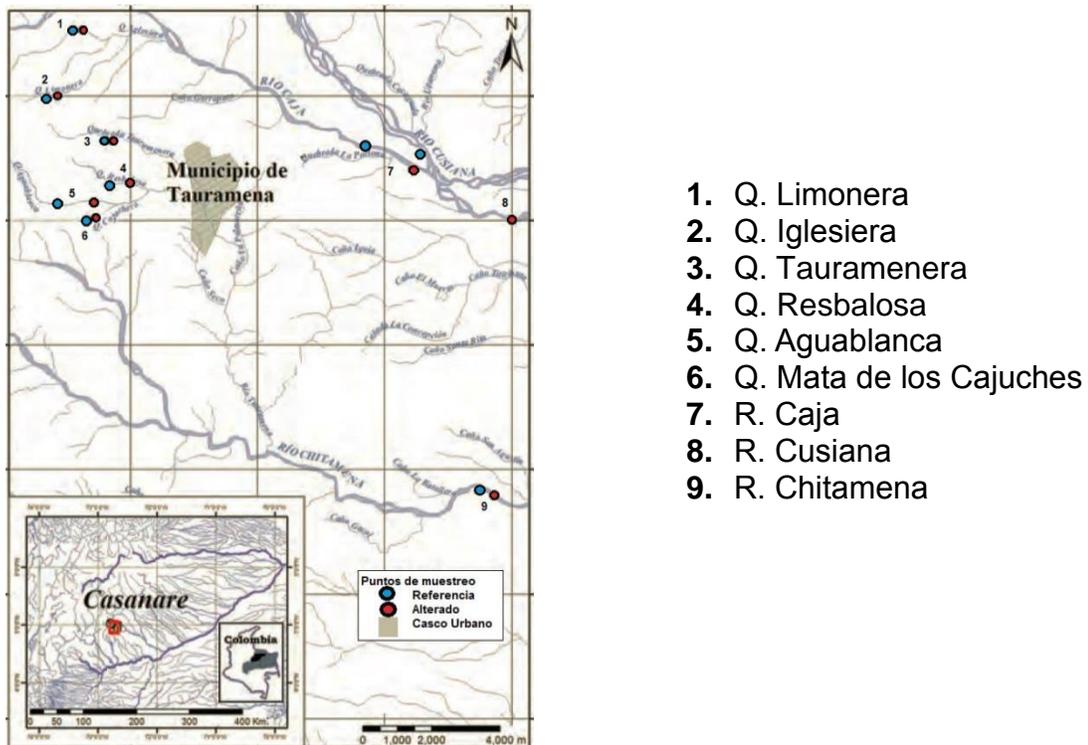


Figura 4. Ubicación del área de estudio. Imagen tomada y modificada de Urbano-Bonilla *et al.*, (2014).

La distribución temporal de las lluvias o su comportamiento durante el año en el piedemonte llanero es de tipo monomodal. Este sistema climático, constituido por una estación seca y una estación lluviosa, muestra el régimen pluvial dominante en toda la región, produciendo un ciclo hidrológico con cuatro variaciones significativas en el cual el nivel mínimo de agua se advierte en los meses de febrero a marzo (aguas bajas) y el máximo nivel se presenta en los meses de agosto a septiembre (aguas altas). Además se marcan otros dos periodos, llamados de ascenso (abril a junio) y descenso (noviembre a diciembre) (Mora *et al.*, 2007). En la Orinoquía el promedio de precipitación incrementa de Oriente a Occidente y de Norte a Sur con 2772 mm en cercanías al piedemonte (estación La Libertad) (Figura 5).



Figura 5. Precipitación media mensual en Tauramena durante el tiempo de estudio (IDEAM). Se señalan los dos periodos de muestreo: alta precipitación (317,2mm) y baja precipitación (24,7mm).

La parte alta de cuenca registra los valores de temperatura más bajos con datos que oscilan entre 5,2 y 11,1°C, teniendo al mes de enero con el valor más alto y el mes de julio con el más bajo. En la parte media, alrededores de Aguazul y Tauramena, la temperatura aumenta y se mantiene alrededor de los 25 y 26°C. La parte baja posee el valor más alto de toda la cuenca con registros que oscilan

entre 24,7 y 27,4°C. La humedad relativa media se mantiene en general por encima del 60% en todo el año (Corpoboyacá, 2013).

Los suelos del piedemonte llanero son producto de la denudación de la cordillera oriental, están constituidos por arcillas y conglomerados que se modelan por los cauces que provienen de la cordillera (Sánchez, 2010). En los suelos de los llanos orientales predominan los depósitos cuaternarios de origen fluvial, las rocas sedimentarias del Terciario (areniscas, lodolitas y calizas) que reposan sobre sedimentitas del Cretáceo, Paleozoico y rocas cristalinas félsicas del Precámbrico (Malagón, 2003). Predomina el cuarzo en la fracción de arena y caolinita, óxidos de hierro y aluminio en la fracción de arcilla que han sido clasificados en su mayoría como oxisoles. Se caracterizan por ser muy evolucionados, presentar alta acidez y baja fertilidad, son producto de depósitos no muy antiguos que no son propensos a las inundaciones pero si tienen influencia de los vientos de la cordillera (Sánchez, 2010).

El piedemonte, por ser zona de montaña es considerado como reserva hídrica por la cantidad de quebradas y caños que nacen allí, se encuentran pastos naturales y pastos manejados usados para el pastoreo y otros de cultivos de subsistencia. La altiplanicie con lomas y piedemonte son suelos destinados a la ganadería, razón por la cual se ha sometido a un proceso acelerado de deforestación, en detrimento de las áreas de los bosques naturales, además dentro de la zona del piedemonte se destaca la explotación petrolera; en donde se han instalado la mayoría de las empresas explotadoras de hidrocarburos, las cuales han inaugurado el uso del suelo de tipo industrial, reclamando nuevas áreas de circulación vial, áreas de localización de pozos, de producción y de prestación de servicios para la explotación, además de recursos hídricos para el consumo y la eliminación de residuos líquidos. Finalmente se encuentran las sabanas, planicies y valles, zonas destinadas a los pastos naturales y pastos manejados para ganadería y la agricultura (Alcaldía de Tauramena, 2012).

8.2. DISEÑO MUESTRAL

Para conocer la respuesta de la comunidad de diatomeas a las alteraciones antrópicas y a la variación por período hidrológico, se seleccionaron nueve corrientes: tres ríos y seis quebradas de bajo orden, tres quebradas con alteración por actividad ganadera, tres quebradas con extracción de caudal y tres ríos alterados por actividades de extracción de materiales del lecho (Tabla 1).

Tabla 1. Localización de los sitios de muestreo en el tramo de referencia (R) y de alteración (A)

| Tipo de alteración | Corriente | Tramo | Altitud msnm | Longitud | Latitud |
|------------------------|-------------------------------|-------|--------------|----------------|----------------|
| Ganadería | Quebrada Aguablanca | R | 598 | 72° 47' 16.5'' | 5° 0' 23.6'' |
| | | A | 532 | 72° 46' 34.7'' | 5° 0' 17.5'' |
| | Quebrada Iglesias | R | 488 | 72° 47' 18'' | 5° 0.2' 43.9'' |
| | | A | 484 | 72° 47' 13'' | 5° 0.2' 46'' |
| | Quebrada Resbalosa | R | 536 | 72° 47' 27'' | 5° 0' 46.6'' |
| | | A | 515 | 72° 46' 0.3'' | 5° 0' 35.7'' |
| Extracción de Caudal | Quebrada Tauramenera | R | 592 | 72° 47' 6.3'' | 5° 0.1' 4.5'' |
| | | A | 582 | 72° 47' 3.3'' | 5° 0.1' 4.6'' |
| | Quebrada Mata de los Cajuches | R | 558 | 72° 46' 40.8'' | 5° 0' 0.5'' |
| | | A | 557 | 72° 46' 32.7'' | 5° 0' 2.6'' |
| | Quebrada Limonera | R | 600 | 72° 47' 18.8'' | 5° 1' 53.8'' |
| | | A | 555 | 72° 47' 18.1'' | 5° 0.1' 57'' |
| Extracción de Material | Río Caja | R | 329 | 72° 42' 17.9'' | 5° 1' 11.8'' |
| | | A | 314 | 72° 41' 33.8'' | 5° 0' 49.3'' |
| | Río Cusiana | R | 326 | 72° 41' 27.8'' | 5° 0.1' 21.7'' |
| | | A | 298 | 72° 40' 0.46'' | 5° 0' 0.13'' |
| | Río Chitamena | R | 259 | 72° 40' 30.9'' | 4° 55' 39.6'' |
| | | A | 253 | 72° 40' 16.5'' | 4° 55' 35.1'' |

En cada corriente se tomaron muestras durante dos periodos hidrológicos contrastantes: uno de mayor precipitación en el mes de septiembre y uno de menor precipitación en el mes de febrero (Figura 5). En los puntos donde se encontró la alteración se establecieron dos tramos de 75 metros cada uno, el primero aguas arriba de la alteración que se tomó como “referencia”, sin la alteración y el segundo aguas abajo con la presencia de la alteración que se denominó “alteración” (Figura 4).

8.3. MATERIALES Y MÉTODOS

8.3.1. Medición de Variables Físicoquímicas del Agua

Para la caracterización limnológica de las corrientes de agua fueron analizadas las variables físicoquímicas *in situ* y en laboratorio certificado. Los parámetros físicoquímicos que se cuantificaron *in situ* mediante sondas digitales debidamente calibradas fueron la temperatura, el oxígeno disuelto, la conductividad eléctrica, pH, caudal y la velocidad de corriente, la materia orgánica gruesa se midió en troncos sobre el canal de longitud superior a 50 cm y diámetro superior a 3 cm, se calculó el volumen total en el tramo de 75 m. Adicionalmente, se tomaron muestras de agua que fueron trasladadas en una hielera (aproximadamente a 4°C) a laboratorio para el análisis de nutrientes (nitrógeno, fósforo) en sus formas solubles y totales, algunos micronutrientes (Na, K, Fe, Si, Ca, Mg) y parámetros relacionados con la calidad del agua (Sólidos, Dureza total, DBO, DQO, entre otros).

La caracterización hidromorfológica incluyó la profundidad, el ancho del canal y la velocidad de corriente para todos los sistemas excepto en el Río Cusiana, donde no se realizaron las mediciones del ancho del canal, ni de caudal, debido a su magnitud.

8.3.2. Recolección de muestras de diatomeas

La comunidad de diatomeas se tomó en rocas, utilizando un perifitómetro, que consiste en un tubo de plástico de 3cm de diámetro con los bordes de un extremo cubierto por caucho para permitir una mejor adherencia al sustrato. El raspado se realizó con un cepillo de cerdas duras y se depositó en frascos con solución de formol al 4% para su posterior tratamiento, conteo e identificación (Prygiel & Coste, 2000). Cada tramo de muestreo fue de 75m, dividido en segmentos de 15m, en cada segmento se tomaron seis rocas ubicadas en diferentes hábitats, para un total de 30 rocas por tramo y se integraron en una sola muestra de 212.14cm² (Figura 6).

8.3.3. Limpieza y montajes de diatomeas

En laboratorio las diatomeas fueron limpiadas mediante el método de oxidación con peróxido de hidrógeno para eliminar la materia orgánica y los sedimentos. El procedimiento inicia con el lavado para retirar la solución de formol, consiste en tomar 1 ml de muestra, agregarle 5 ml de agua destilada, centrifugar a 2000 rpm y remover el sobrenadante. Posteriormente a la muestra se le agregaron 6 ml de H₂O₂ (30%) y se llevó a baño maría (70°C) hasta que la materia orgánica se ha eliminado en el proceso de oxidación. Posteriormente, se agregaron 0,3 ml de HCl (1N) para neutralizar el pH, facilitar la apertura de las valvas de diatomeas y transparentar la materia orgánica que no fue digerida (Iserentant *et al.*, 1999). Una vez digerido el material, para cada muestra se montaron dos preparaciones permanentes con Naphrax™.

8.3.4. Análisis cualitativo

Identificación taxonómica y tamaño de muestra. La revisión del material se realizó en un microscopio de contraste por interferencia diferencial Zeiss

Axio.Imager A2 a 1000x. Se realizó la cuantificación, contando hasta 500 valvas de diatomeas. La identificación taxonómica se realizó mediante las claves de Krammer & Lange-Bertalot (1986, 1991), Lange-Bertalot (1993, 1995a, 1995b, 1998, 2000, 2007), como parte del análisis taxonómico se tomaron fotografías de los taxa para la conformación de la muestra iconográfica.

Identificación de rasgos biológicos. Los rasgos biológicos que se utilizaron fueron: forma de vida, tipos de tamaño y gremios ecológicos.

Tabla 2. Asignación de los taxones a métricas biológicas (formas de vida) (Rimet & Bouchez, 2011)

| Forma de vida | Taxa |
|-----------------------|---|
| Adnada | <i>Achnanthes, Achnanthidium, Adlafia, Amphora, Camaepinnularia, Cocconeis, Cymbella, Denticula, Diatoma, Encyonema, Encyonopsis, Eolimna, Eunotia, Fallacia, Fistulifera, Fragilaria, Gomphonema, Gyrosigma, Mayamaea, Melosira, navicula, Nitzschia, Planothidium, Sellaphora, Staurosira, Ulnaria.</i> |
| Móvil | <i>Achnanthes, Achnanthidium, Adlafia, Amphora, Camaepinnularia, Cocconeis, Cymbella, Denticula, Encyonema, Encyonopsis, Eolimna, Fallacia, Fistulifera, Gomphonema, Gyrosigma, Mayamaea, Navicula, Nitzschia, Planothidium, Sellaphora.</i> |
| Mucosa Tubular | <i>Encyonema, Encyonopsis.</i> |
| Pedunculada | <i>Achnanthes, Achnanthidium, Diatoma, Fragilaria, Gomphonema, Planothidium.</i> |

- *Forma de vida:* Hay siete grupos o clasificaciones de formas de vida asignadas para las diatomeas: bentónica, planctónica, móvil, colonial, agregado tubular, pedunculada y pioneras. Se seleccionaron cuatro de estas formas de vida para clasificar los organismos (Tabla 2). Los taxones han sido asignados a uno más de estos grupos de formas de vida (Rimet & Bouchez, 2011).

- *Tipos de tamaño:* El cálculo del biovolumen celular se basó en ecuaciones propuestas por Sun & Liu, (2003). Los taxones fueron asignados a cinco clases tamaño: Clase 1 que consiste en taxones con biovolumen menor a $99 \mu\text{m}^3$, Clase 2 entre 100 y $299 \mu\text{m}^3$, Clase 3 entre 300 y $599 \mu\text{m}^3$, Clase 4 entre 600 y $1499 \mu\text{m}^3$ y Clase 5 mayor que $1500 \mu\text{m}^3$ (Rimet & Bouchez, 2011).

- *Gremios ecológicos:* Las diatomeas fueron clasificadas en tres gremios ecológicos (Tabla 3) que reflejan la forma de crecimiento (bajo, alto y móviles). El grupo de bajo perfil incluye especies postradas, adnadas, erectas, formas céntricas y especies que se mueven lentamente cerca del sustrato. El grupo de perfil alto incluye especies de talla alta, comprende erectas, ramificadas, de formación tubular y en cadena, filamentosas, pedunculadas y colonias céntricas. El tercer grupo son las móviles incluyen especies que pueden moverse relativamente rápido (Passy, 2007a).

Tabla 3. Asignación de Taxa a los tres gremios ecológicos adaptados de Passy (2007a)

| Gremios ecológicos | Composición taxonómica |
|---------------------------|--|
| Bajo perfil | <i>Achnantheidium, Achnanthes, Amphora, Brachysira, Cymbella, Cyclotella, Cymbopleura, Cocconeis, Cyclostephanos, Delicata, Diploneis, Discostella, Encyonema, Encyonopsis, Eucocconeis, Fragilaria, Karayevia, Kolbesia, Meridion, Nupela, Planothidium, Platessa, Rhoicosphenia, Reimeria, Stephanodiscus.</i> |
| Alto perfil | <i>Aulacoseira, Achnantheidium catenatum, Diadesmis, Diatoma, Eunotia, Fragilaria, Gomphonema, Gomphoneis, Gomphosphenia, Melosira, Pleurosira, Pseudostaurosira, Staurosira, Starurosirella, Tabularia, Ulnaria.</i> |
| Móviles | <i>Adlafia, Bacillaria, Caloneis, Craticula, Delicata, Denticula, Eolimna, Ephitemia, Fallacia, Fistulifera, Geissleria, Gyrosigma, Hippodonta, Luticola, Mayamaea, Navicula, Naviculadicta, Nitzschia, Nupela, Sellaphora, Simonsenia, Stauroneis, Surirella, Tryblionella.</i> |

8.3.5. Análisis de datos

Estructura de la comunidad. El análisis de la estructura de la comunidad se realizó a partir de la elaboración de un listado taxonómico y el conteo, expresado en abundancia relativa de los taxones (Karthick *et al.*, 2010) A partir de estos datos se calcularon diferentes índices ecológicos para describir la comunidad y las asociaciones.

Para la estimación de la diversidad se utilizó la Riqueza Específica (S), el índice de Shannon (H'), el índice de dominancia de Simpson ($1/\lambda$). También se calculó el índice de equidad de Pielou (J') (Magurran, 2004). Para establecer si existen diferencias entre los sitios de alteración con respecto a los de referencia, y entre periodos hidrológicos se utilizó el índice de similitud de Jaccard (JAC) y de Bray-Curtis (BC). Estos análisis se realizaron utilizando el software libre PAST (Hammer, *et al.*, 2001).

Estructura de los rasgos funcionales. Las proporciones de todas las especies se agruparon por grupo funcional para determinar la abundancia relativa y el índice de diversidad de Shannon. Para probar si existe similitud entre la composición de la comunidad entre los sitios de con alteración antrópica y los sitios sin la alteración se realizó la prueba de similitud utilizando el análisis de similitud ANOSIM de dos vías.

Estructura de las variables medioambientales. Para identificar los patrones estacionales o entre sitios de referencia y alterados se realizó análisis de componentes principales (ACP), el cual permitió resumir en unas pocas variables o componentes la variación debida al total de los datos fisicoquímicos y por último, para determinar la posible relación entre las especies de diatomeas con las variables fisicoquímicas se realizó un análisis de correspondencia canónica (ACC). Se llevó a cabo un análisis multivariado (RDA: Análisis de Redundancia) a fin de

estimar qué porcentaje de la varianza de la abundancia de rasgos ecológicos fue explicado por las variables ambientales. Estos análisis se elaboraron utilizando el software CANOCO de Windows 4.5 (ter Braak & Smilauer, 1998).

9. RESULTADOS

9.1. VARIABLES AMBIENTALES DE LAS CORRIENTES

La mayoría de los parámetros medidos mostró diferencias entre la dinámica de las quebradas con respecto a los ríos. Un gran número de datos se encontraron por debajo de los límites detectables y los ríos tuvieron valores más altos en las mediciones (Anexo B). Las corrientes estudiadas dentro de este proyecto se encuentran entre los 263 y 600 m, siendo los ríos los de menor altitud, por lo que hay una relación inversa con la temperatura, que aumentó a medida que se desciende en altitud, con valores en torno a los 23°C en las quebradas y valores un poco más altos en los ríos, al alrededor de los 27°C (Tabla 4).

Tabla 4. Valores promedio de las variables abióticas en cada corriente: Temperatura, pH, conductividad, oxígeno disuelto, Velocidad y Turbiedad.

| Tipo de alteración | Corriente | Temp. °C | pH | Cond. µS/cm | O.D. mg/l | Veloc. m/s | Turb. UNT |
|------------------------|-------------------------|----------|-----|-------------|-----------|------------|-----------|
| Ganadería | Q. Aguablanca | 23,7 | 5,2 | 2,6 | 7,5 | 0,2 | 0,7 |
| | Q. Iglesias | 25,2 | 5,9 | 6,5 | 7,6 | 0,3 | 2,4 |
| | Q. Resbalosa | 23,5 | 5,5 | 4,2 | 6,7 | 0,1 | 1,1 |
| Extracción de Caudal | Q. Tauramenera | 23,9 | 5,4 | 2,3 | 7,6 | 0,2 | 0,8 |
| | Q. Mata de los Cajuches | 23,3 | 5,2 | 3,3 | 7,2 | 0,2 | 1,2 |
| | Q. Limonera | 23,3 | 4,9 | 5,9 | 7,7 | 0,3 | 12,1 |
| Extracción de Material | R. Caja | 26,6 | 7,8 | 64,7 | 7,9 | 0,5 | 8,0 |
| | R. Cusiana | 23,0 | 7,6 | 143,5 | 8,2 | 0,4 | 33,1 |
| | R. Chitamena | 28,8 | 7,3 | 18,1 | 7,7 | 0,3 | 11,4 |

La concentración de oxígeno disuelto en el agua fue mayor en ríos (promedio 8,0 mg/l O₂) que en las quebradas (promedio de 7,4 mg/l O₂) posiblemente por la velocidad de la corriente, sin embargo el contenido disminuyó en todas las corrientes durante periodo seco, en general la oxigenación siempre tuvo valores mayores a 6,5 mg/l O₂.

Las quebradas presentaron pH ácido (entre 4,9 y 5,9), en ríos el pH fue más alto (entre 7,1 y 8,6) valores que tienden a rangos de pH alcalino. La alcalinidad no supera los 5 mg/l de CaCO₃ en quebradas y el máximo valor se encontró en el Río Cusiana con 28 mg/L de CaCO₃. Aunque la alcalinidad también fue mayor en ríos, en general todas las corrientes presentaron valores bajos. La dureza estuvo por debajo de los límites detectables para las quebradas, en los ríos los valores se incrementaron en todos los puntos de muestreo durante periodo seco (hasta 28 mg/L CaCO₃)

La concentración de sólidos totales se encontró en la mayoría de las corrientes por debajo de los límites detectables (<35mg/l) excepto en los ríos donde las mediciones son bastante heterogéneas, de igual forma los sólidos disueltos y los sólidos suspendidos fueron detectables solo para los ríos. La turbidez también fue muy baja especialmente en las quebradas (<1.5 UNT) con excepción de la Q. Limonera donde hay valores de 40 UNT durante lluvias, los ríos presentan este mismo comportamiento estacional. La conductividad refleja corrientes de baja mineralización pero diferenciables entre quebradas y ríos por estacionalidad climática, especialmente en el Río Caja y el Río Cusiana (120µS/cm y 258 µS/cm en el periodo seco).

Las diferentes formas de los compuestos de nitrógeno y fósforo fueron muy bajas en todas las corrientes: nitratos (<0,12mg/l), nitritos (<0,55mg/l), amonio (<0,18 mg/l) y fósforo total (<0,14 mg/l). Las Quebradas con ganadería presentaron valores mayores de nitratos y fósforo en el periodo de lluvias y de nitritos en

sequía, sin variaciones entre el tramo de referencia y el alterado. Las quebradas con extracción de caudal, los nitritos y el amonio fueron mayores en el periodo seco y los nitratos en sequía. La extracción de agua promovió el aumento de amonio. Finalmente, en los ríos se encontró un incremento en los nitritos y el amonio en los puntos con extracción de material y por estacionalidad el amonio es mayor en sequía y el fósforo total en lluvias.

Respecto a la hidrodinámica de las corrientes, la velocidad fue más baja en las quebradas con un promedio de velocidad de la corriente por periodo de lluvia y sequía de 0,26 m/s y 0,22 m/s y los ríos 0,55 m/s y 0,33 m/s respectivamente. Los caudales presentaron la misma tendencia con promedio para las quebradas de 0,08 m³/s en lluvias y 0,02 m³/s en sequía, mientras que en los ríos la medición fue de 7,5 m³/s en lluvias y 1,6 m³/s en periodo de seco, no fue posible realizar la medición del caudal en el río Cusiana. Todas las corrientes con extracción de caudal mostraron reducción en los puntos alterados excepto en la Q. Mata de los Cajuches en época lluviosa donde contrario a lo esperado no hubo reducción del caudal sino incremento (40%), mientras que en sequía si se evidenció reducción del 40% del caudal en relación con el punto sin la alteración. La reducción del caudal en el punto alterado durante las lluvias y la sequía fue de 31 y 49% para la Q. Limonera y en la Q. Tauramenera fue de 28 y 76%, respectivamente.

El análisis de componentes principales (ACP) para las variables fisicoquímicas de todos los sistemas estudiados mostró diferencia en la química del agua entre los ríos y las quebradas. El biplot del ACP describe el 59,1% de la variación de los datos, en la que el primer eje explica el 38,8% y el segundo eje 20,3%. Los ríos se asociaron con valores mayores de turbiedad, dureza, conductividad, sólidos suspendidos totales y cationes (Mg⁺⁺, Na⁺, Ca⁺⁺), mientras que en las quebradas el mayor aporte a la variabilidad fue dada por el pH, sulfatos, velocidad de la corriente, temperatura y MO (Figura 6).

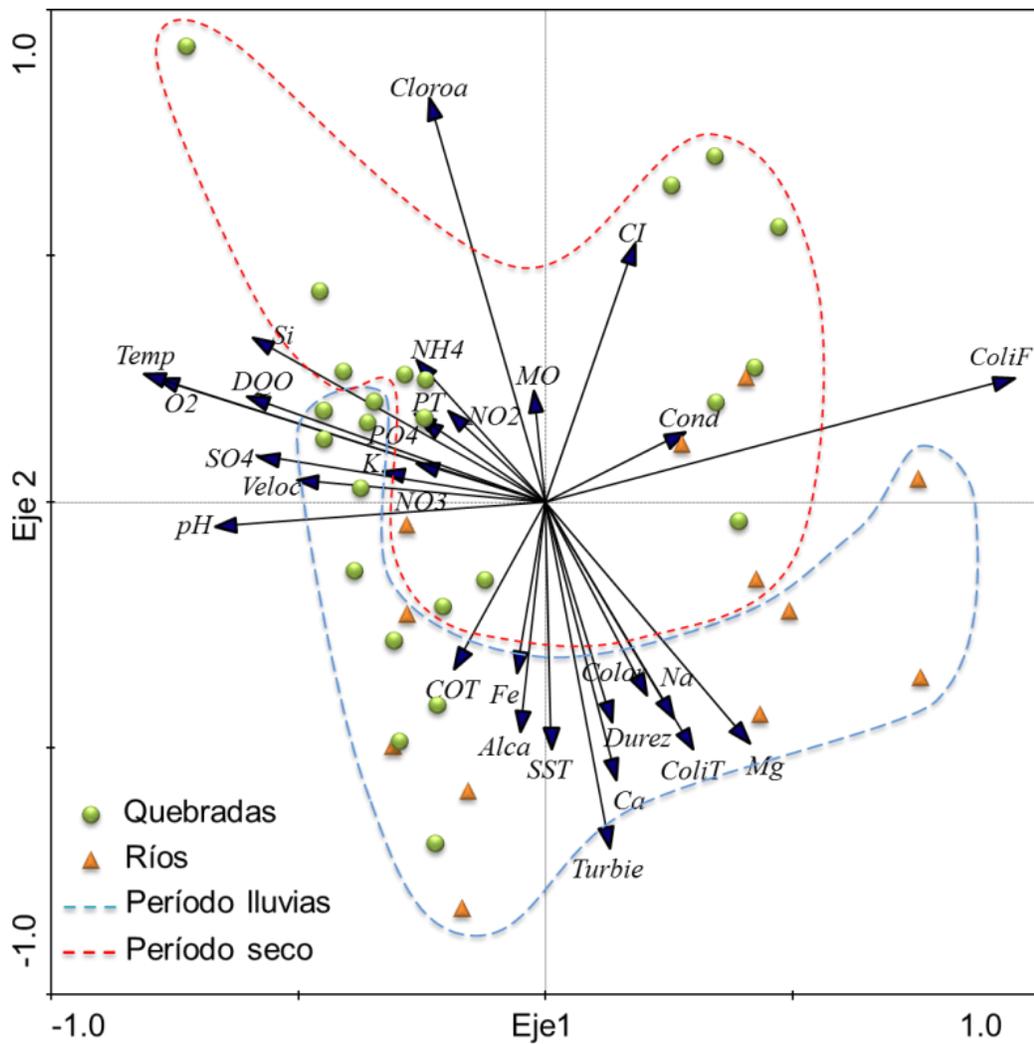


Figura 6. Análisis de Componentes Principales (ACP) de las variables fisicoquímicas para todos los sitios de muestreo.

Ganadería. En la ordenación de las variables, el análisis describe 79,4% de la variación en los datos, donde el 49,1% es explicado por el primer eje y el 30,3% por el segundo eje, las variables significativas en este modelo fueron materia orgánica, velocidad de la corriente y sulfatos. Las quebradas se agruparon por periodo hidrológico: en sequía la conductividad y materia orgánica fueron mayores, en el periodo lluvioso se encontraron valores mayores en el pH, oxígeno

disuelto, sulfatos, sílice y alcalinidad. No se observan patrones entre los puntos con y sin afectación por ganadería. (Figura 7).

Extracción de caudal. El biplot describe el 78,4% de la variación, donde el 57,6% está representado en el primer eje y el 20,8% en el segundo, con los sulfatos y materia orgánica como variables significativas. El análisis permitió establecer que la estacionalidad direccionó los cambios en la química del agua de las quebradas con una mayor disponibilidad de nutrientes, clorofila a, carbono inorgánico y conductividad en sequía. La Q. Limonera presentó la mayor variabilidad entre los periodos climáticos, donde la turbiedad, sólidos totales, calcio y materia orgánica influyen el periodo lluvioso, en periodo seco en el punto con alteración presentó valores mayores de pH, oxígeno disuelto, sílice y temperatura (Figura 7).

Extracción de material. En los ríos cada uno presentó un patrón diferente en los parámetros fisicoquímicos, El ACP, explicó el 64,3% de la varianza, 43,5% en el primer eje y 20,8 en el segundo eje donde la dureza, sílice y sulfatos fueron las variables significativas. Los puntos del Río Cusiana se relacionaron con valores mayores de calcio, dureza, sodio y hierro. Los puntos del Río Caja con valores mayores en los nutrientes (nitrógeno y fósforo), clorofila a y conductividad. El Río Chitamena con valores superiores en silicio, temperatura, oxígeno disuelto, pH y DQO. No hubo tendencias aparentes en la fisicoquímica del agua por la actividad de extracción del lecho en los ríos, puesto que no se observan patrones de distribución entre los puntos de referencia y alterados. Las muestras de la temporada de lluvias se separó de las de temporada de sequía a lo largo del eje 1, donde el periodo seco mostró mayor concentración de nutrientes, conductividad y clorofila a y el periodo lluvioso mayores valores en sólidos suspendidos totales, hierro, turbidez, sulfatos y DQO (Figura 7).

géneros. Los órdenes Naviculales y Achnanthes presentaron el mayor número de familias, 10 y 3 respectivamente. Sin embargo, la mayor fracción de la biomasa estuvo representada en los órdenes Naviculales, Eunotiales y Cymbellales. Las familias con mayor abundancia fueron Eunotiaceae, Diadesmidaceae, Cymbellaceae y Naviculaceae, esta última presentó la mayor cantidad de géneros.

La composición de la comunidad de diatomeas fue muy diferente entre los ríos y las quebradas. La mayor riqueza de familias y géneros se encontró en los ríos, con 20 familias y 31 géneros, las familias más dominantes fueron: Cymbellaceae, Naviculaceae, Sellaphoraceae y Bacillariaceae. En las quebradas se presentaron 15 familias y 26 géneros. Las familias más representativas fueron: Eunotiaceae, Diadesmidaceae y Surirellaceae.

Las quebradas Mata de los Cajuches y Tauramenera estudiadas para extracción de caudal, presentaron una composición muy semejante a nivel de familia, con más del 70% de la abundancia relativa entre Eunotiaceae y Diadesmiaceae. Entre zonas alteradas y de referencia se presentaron algunos cambios en las familias menos representativas. La Q. Limonera, presentó diferencias en composición en relación con las otras dos quebradas. En el sitio alterado se observó una mayor presencia de Surirellaceae mientras que en referencia se presentó Amphipleuraceae en mayor proporción. En las quebradas seleccionadas para analizar la actividad ganadera se observó que la composición a nivel de familia fue diferente entre las quebradas y no fue muy evidente un patrón entre sitios alterados y de referencia. Así mismo, en los ríos se presentó una alta heterogeneidad en la composición de cada corriente y es más probable encontrar cambios estacionales que por la alteración (Figura 8).

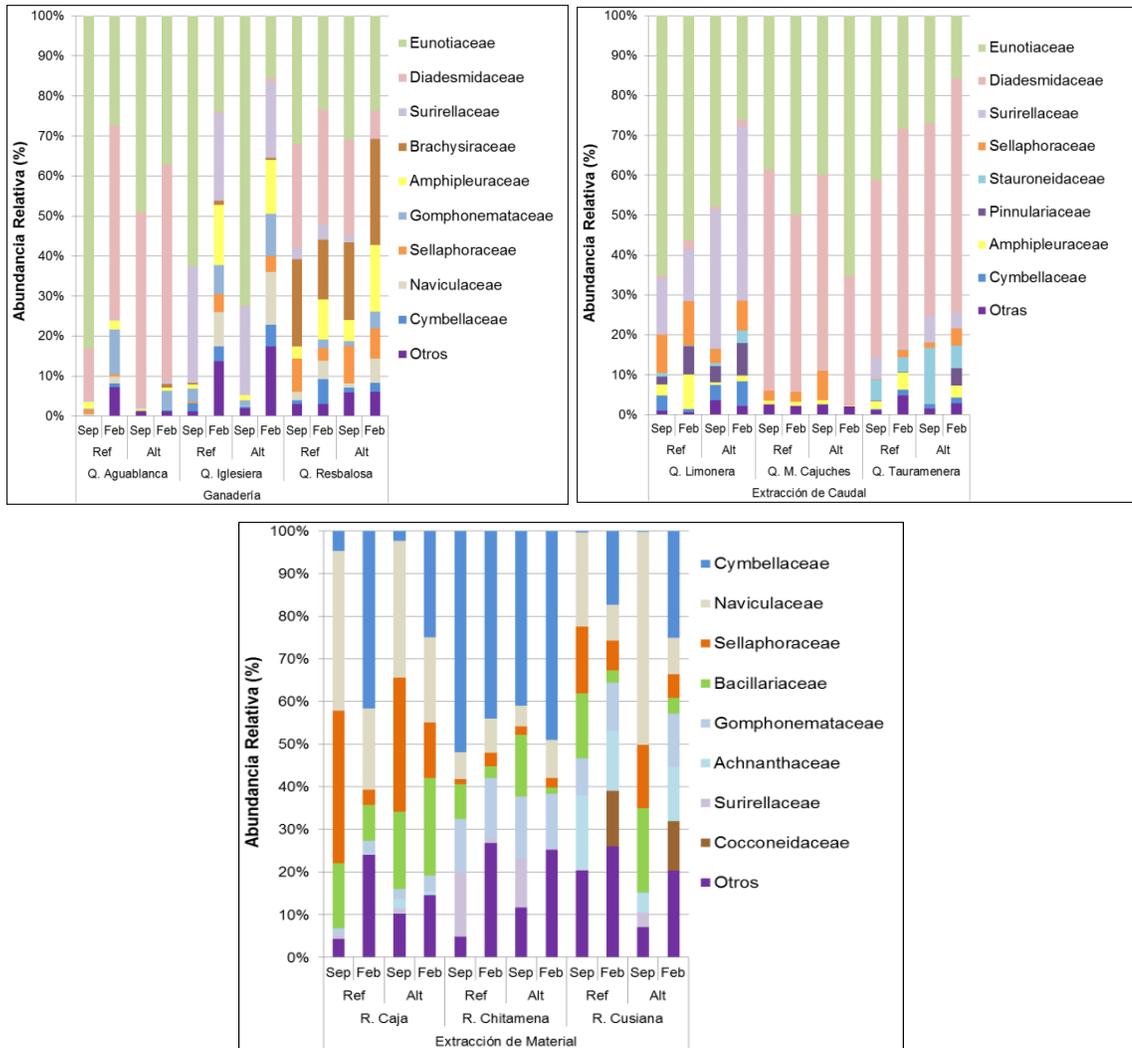


Figura 8. Gráficas de abundancia de cada familia en cada sitio de muestreo por tipo de alteración. Período de lluvia (Sep.), período sequía (Feb.), puntos de referencia (Ref.), puntos alterados (Alt.).

Ganadería. De los 71 morfotipos encontrados en las quebradas con alteración por ganadería los taxones con mayor abundancia relativa fueron *Eunotia parasiolii* (18,3%), *Eunotia sp6* (9,7%), *Nupela sp3* (8,2%), *Brachysira brebissonii* (7,3%), *Eunotia cf. vixexigua* (7,2%) y *Surirella sp2* (7,1%), los otros 65 taxones sumaron 41,8%. Los puntos de referencia y alterados tuvieron 62 y 64 taxones, mientras

que en época de lluvia y época de sequía se observaron 55 y 69 taxones respectivamente (Figura 9).

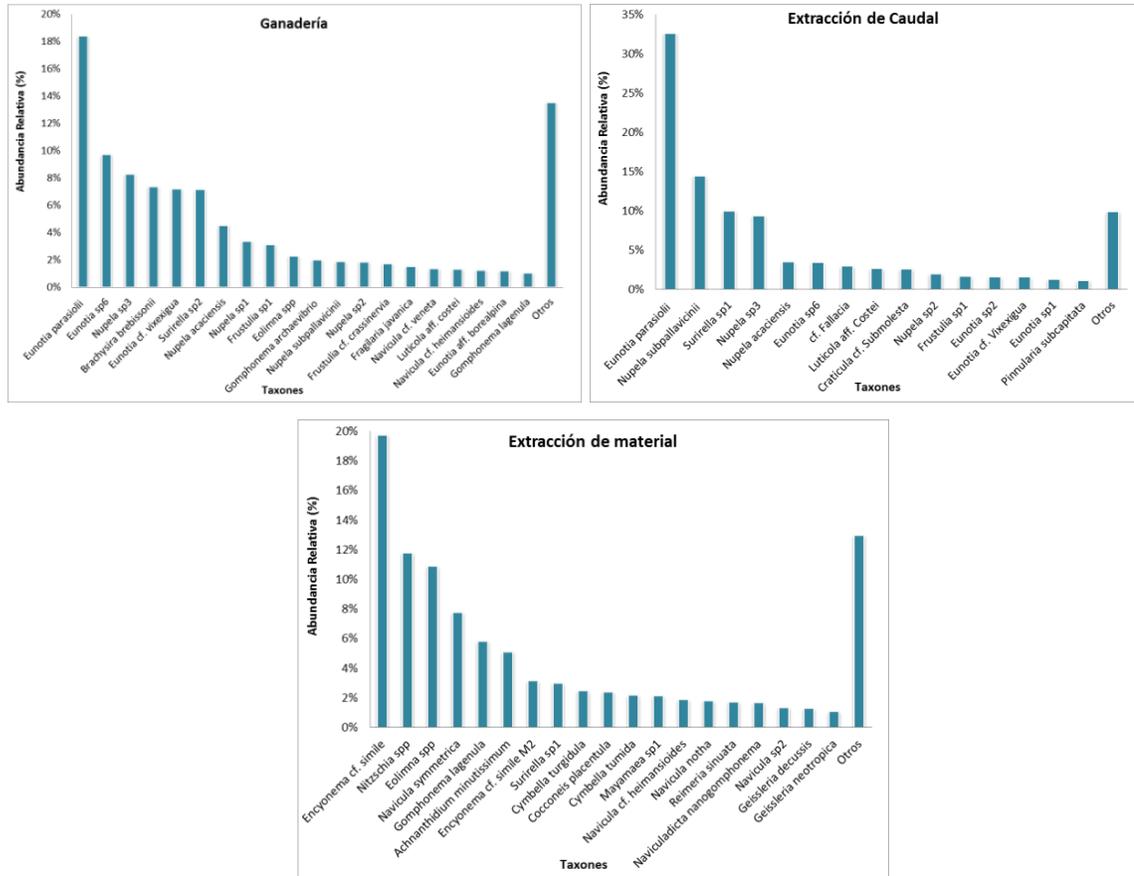


Figura 9. Gráfica de abundancia relativa de especie por cada tipo de alteración.

Extracción de caudal. En las tres quebradas de extracción de caudal se encontraron 63 taxones, de los cuales tres de ellos suman más del 50% de la abundancia relativa. Las especies dominantes fueron *Eunotia parasiolii* (32,5%), *Nupela subpallavicinii* (14,4%), *Surirella sp1* (9,9%), *Nupela sp3* (9,3%), los 59 taxones restantes suman un 33,7%. *Eunotia parasiolii* dominó en ambos periodos hidrológicos y en los puntos de referencia y de alteración, *Nupela subpallavicinii* fue codominante en los puntos de referencia y en los puntos con alteración codominó *Surirella sp1* (Figura 9).

Extracción de material. En los ríos con alteración de extracción de material se encontraron 95 morfotipos en total. Durante período de lluvia y sequía se hallaron 55 y 81 taxones y en los puntos de referencia y alterados 83 y 75 taxones. El taxón dominante fue *Encyonema cf. simile* (19,7%), seguido en abundancia por *Nitzschia spp* (11,7%), *Eolimna spp* (10,8%), *Navicula symmetrica* (7,7%), *Gomphonema lagenula* (5,8%) y *Achnantheidium minutissimum* (5,1%), los 89 taxones restantes suman 38,9% de la abundancia. La especie dominante fue *Encyonema cf. simile*, en codominancia con *Nitzschia spp* en alteración y sequía y *Eolimna spp* en referencia y periodo de lluvias (Figura 9).

9.2.1. Composición de la comunidad de diatomeas por alteración y periodo climático

La composición de la comunidad de diatomeas mediante el análisis de similitud de Jaccard mostró dos agrupaciones, los ríos (15% similitud) y las quebradas (25% similitud), se encontró la segregación de la Q. Iglesias que presentó una mayor similitud en la composición de la comunidad con los ríos. Las quebradas no se agruparon estrictamente por tipo de alteración. Dentro de las corrientes con ganadería las quebradas fueron muy diferentes entre sí. La Q. Iglesias y Q. Aguablanca se agruparon por periodo climático, mientras que la Q. Resbalosa se agrupó por alteración. En las quebradas seleccionadas con extracción de caudal, las quebradas Mata de los Cajuches y Limonera presentaron agrupación estacional, mientras que la Q. Tauramenera presentó una segregación entre el punto de referencia y el punto alterado. En los ríos con extracción de material cada corriente se agrupó por estacionalidad (Figura 10).

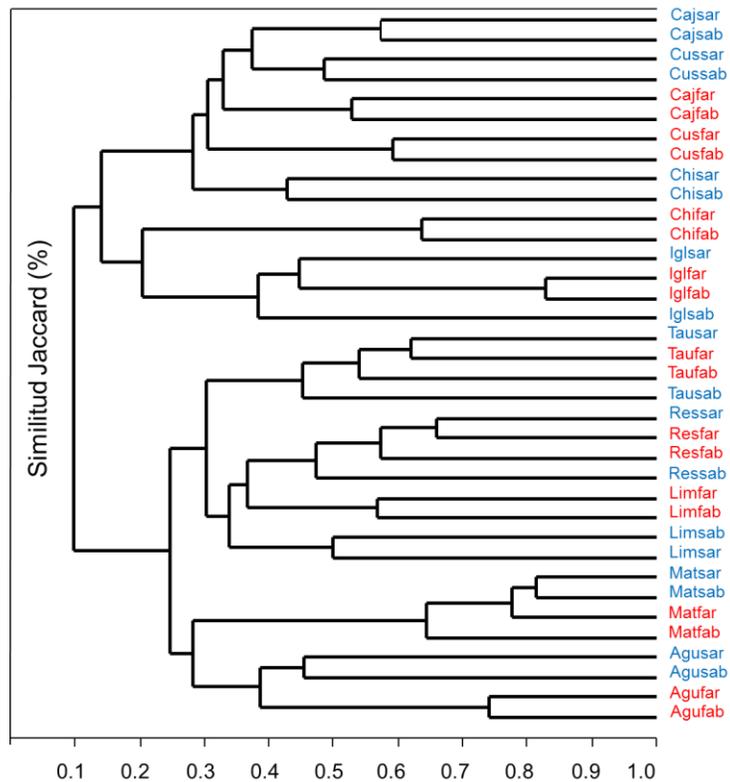


Figura 10. Gráficas de similitud de Jaccard de todos los puntos de muestreo. En texto azul (lluvia), texto rojo (sequía). Abreviaciones en el anexo A.

9.2.2. Diversidad ecológica de la comunidad de diatomeas

Ganadería. Las quebradas con alteración por ganadería presentaron diferencias en la cantidad de taxones, la Q. Resbalosa tuvo mayor riqueza con más de 30 taxones en cada punto, en contraste con la Q. Aguablanca que tuvo entre 15 y 20 taxones. Se observó incremento de la riqueza durante el período de sequía, de igual forma la dominancia y la diversidad variaron en todas las corrientes con la estacionalidad, así durante la época de lluvias el número de especies dominantes fue menor que en sequía, el índice de equidad mostró que la abundancia estuvo repartida en varios taxones. Los valores de diversidad hallados estuvieron entre 1,3 y 2,7 nit/cel, en la mayoría de las corrientes, siendo más altos la Q. Resbalosa y en los periodos secos. (Figura 11).

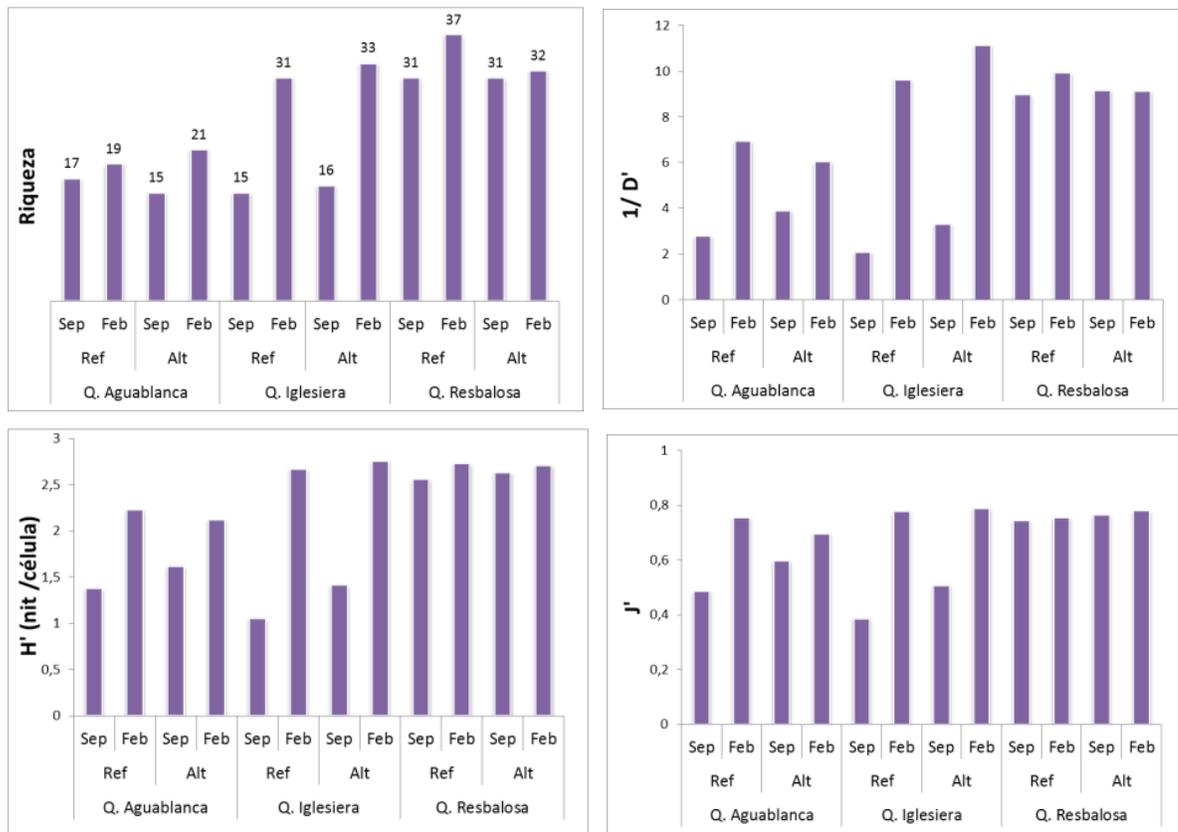


Figura 11. Gráficas de riqueza, dominancia ($1/D'$), diversidad (H') y equidad (J') de morfoespecies en las quebradas con ganadería

Extracción de Caudal. La riqueza fue mayor en las quebradas Limonera y Tauramenera con más de 22 taxones, la Q. Mata de los Cajuches al contrario mostró una riqueza baja con máximo 15 taxones. Por estacionalidad se observó un incremento de morfotipos en época de sequía, excepto en la Q. Mata de los Cajuches. Los índices más bajos de diversidad se encontraron en estas corrientes, pues se encontraron entre 1 y 2,3 nit/cel, la mayoría con valores $H' < 2$ nit/célula, En estas quebradas, la dominancia alta de *Eunotia parasiolii* determina valores medios a bajos en la equidad. Los índices no presentaron un patrón de aumento o disminución de la diversidad en cuanto a la alteración o por la estacionalidad (Figura 12).

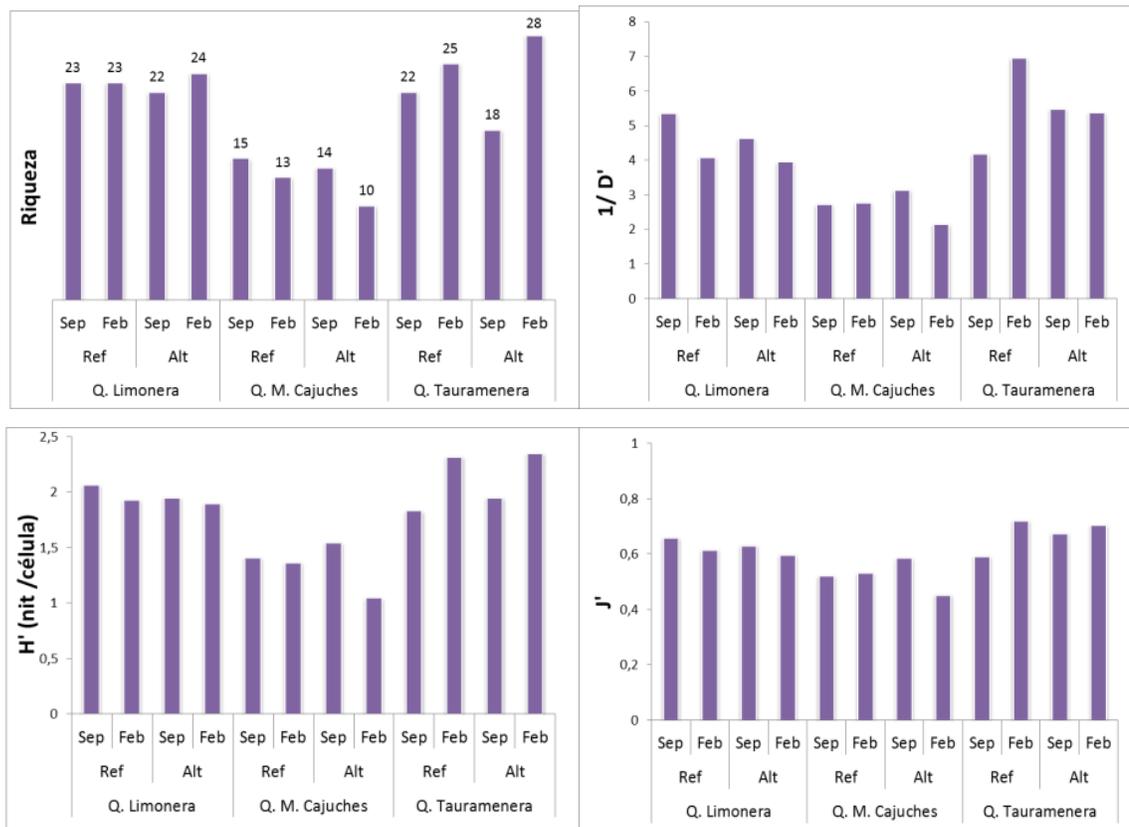


Figura 12. Gráficas de riqueza, dominancia ($1/D'$), diversidad (H') y equidad (J') de morfoespecies en las quebradas con extracción de caudal

Extracción de material. La riqueza específica mostró variación estacional, siendo la época de sequía la que presentó valores mayores. El R. Cusiana tuvo los valores más altos (40 y 38 taxones) en los puntos de referencia y alterado durante el período seco. El R. Chitamena presentó la riqueza de taxones más baja (20 taxones en período de lluvias). Los ríos presentaron diversidad mayor, con valores >2 nit/cel, que siempre fue mayor en el periodo seco y con baja dominancia. La equitatividad y la dominancia reflejaron que las mayores abundancias se distribuyeron en un promedio de seis taxones. En cuanto a la variación por alteración estos índices son ligeramente más altos en los puntos alterados (Figura 13).

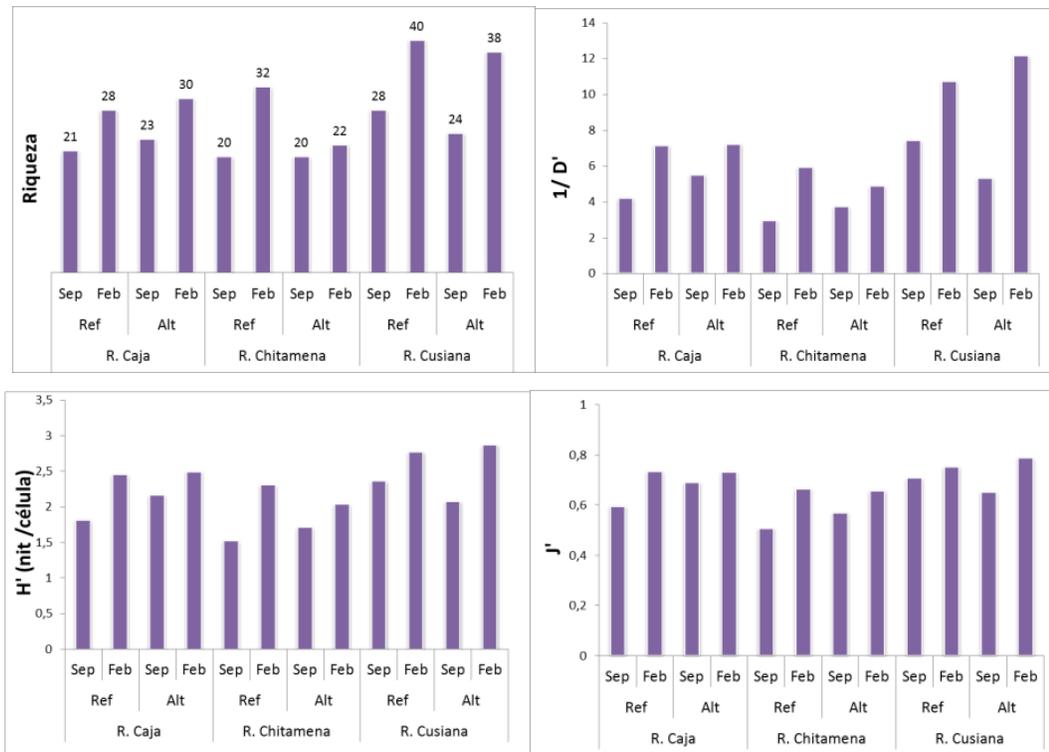


Figura 13. Gráficas de riqueza, dominancia ($1/D'$), diversidad (H') y equidad (J') de morfoespecies en las quebradas con extracción de material

9.3. Relaciones entre la comunidad de diatomeas y las variables físicas y químicas

Ganadería. La relación entre los morfotipos de diatomeas con las variables ambientales se analizó a partir de un ACC el cuál explicó en los tres primeros ejes un 64% de la variación de las especies, mientras que la relación entre las especies y las variables ambientales se explicó en un 75,3% (Tabla 5). Las variables que se correlacionaron significativamente en el modelo con la variación de las especies fueron: materia orgánica con 21,8%, velocidad de la corriente con 16% y sulfatos con 14,9%, otras variables seleccionadas fueron fósforo total, sílice, turbidez, amonio y carbono orgánico total pero no fueron significativas.

Tabla 5. Resumen estadístico del ACC para alteración por ganadería. Los ejes 1, 2, 3 y 4 evaluados con el test de Monte Carlo.

| | Ejes | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Valores propios | 0.771 | 0.333 | 0.204 | 0.184 |
| Correlación especies - Ambiente | 0.994 | 0.885 | 0.989 | 0.994 |
| % acumulado de varianza de especies | 37.7 | 54.0 | 64.0 | 73.0 |
| % acumulado de varianza de relación ambiente - especies | 44.4 | 63.6 | 75.3 | 85.9 |

El ACC mostró la agrupación de los taxones en tres grupos cuya distribución coincide con cada una de las quebradas de estudio (Figura 14). El primer grupo se encontró correlacionado positivamente con valores más altos en las variables sulfato y sílice que predominaron en la Q. Aguablanca, donde los puntos con alteración se asociaron con mayores valores de sulfato. Los taxones relacionados fueron *Eunotia parasiolii*, *Nupela sp3*, *Eunotia cf. vixexigua*, *Nupela sp2*, *Nupela sp1*, *Nupela acaciensis*, *Encyonema cf. simile*, *Eunotia sp4*, *Frustulia sp2*, *Stenopterobia cf. delicatissima*, *Actinella sp1*, *Eunotia sp7*, *Gomphonema archaeovibrio f. cuneatum*, *Fragilaria javanica*, *Cavinula pseudoscutiformis*, y *Eunotia cf. georgii*.

Un segundo grupo de morfotipos conformado por *Brachysira brebissonii*, *Frustulia sp1*, *Nupela subpallavicinii*, *Eunotia sp1*, *Chamaepinularia aff. brassilianopsis*, *Suriella sp1*, *Eunotia aff. borealpina*, *Stenopterobia sp2*, *Stenopterobia sp3*, *Eunotia sp8*, *Encyonema aff. perpusillum*, *Frustulia cf. crassipunctata*, cf. *Fallacia*, *Encyonopsis sp2*, *Eunotia aff. mucophila*, *Pinnularia tenuistriata*, *Pinnularia cf. graciloides var. latecapitata*, *Pinnularia pseudonavicula*, *Stenopterobia sp1*, *Eunotia sp3*, *Navicula symmetrica*, *Pinnularia sp1*, *Kobayasiella spp*, *Eunotia sp2*, *Eunotia aff. novaisiae*, *Luticola aff. costei*, y *Pinnularia cf. subcapitata*, que se relacionaron con niveles menores de sulfato, fósforo, velocidad de la corriente

angusta, *Craticula* cf. *submolesta*, *Navicula cryptotenella*, *Gomphonema lagenula*, *Pinnularia* aff. *divergentissima*, *Gomphonema* sp7, *Brachysira* sp1 y *Luticola* cf. *muticoides*.

Extracción de Caudal. El ACC para las quebradas con alteración por extracción de caudal mostró que los tres primeros ejes explicaron un 60.3% de la varianza de las especies. La relación entre el ambiente y las especies fue explicada en un 73,5% (Tabla 6). Las variables seleccionadas por el modelo fueron: sulfatos, materia orgánica, fósforo total, sílice, calcio, velocidad de la corriente, hierro y nitritos. Las variables que explicaron la variabilidad de los morfotipos fueron materia orgánica con el 24,5% y sulfatos con el 18,8% de la explicación.

Tabla 6. Resumen estadístico del ACC para alteración por extracción de caudal. Los ejes 1, 2, 3 y 4 evaluados con el test de Monte Carlo.

| | Ejes | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Valores propios | 0.566 | 0.409 | 0.195 | 0.166 |
| Correlación especies - Ambiente | 0.997 | 0.917 | 0.977 | 0.957 |
| % acumulado de varianza de especies | 29.2 | 50.2 | 60.3 | 68.8 |
| % acumulado de varianza de relación ambiente - especies | 35.5 | 61.2 | 73.5 | 83.9 |

A partir del análisis se pudo establecer tres grupos de morfotipos (Figura 15). El primero corresponde los taxones *Craticula* sp2, *Navicula cryptotenella*, *Luticola* cf. *muticoides*, *Craticula* cf. *submolesta*, *Gomphonema archaeovibrio* f. *cuneatum*, *Gomphonema* sp2, *Pinnularia* sp3, *Pinnularia* aff. *divergentissima*, *Brachysira* sp2, *Nupela* sp3, *Luticola* aff. *costei*, *Stenopterobia* sp2, *Gomphonema archaeovibrio*, *Frustulia* cf. *crassipunctata*, *Eunotia* aff. *mucophila*, *Pinnularia pisciculus* var. *angusta*, *Sellaphora pupula*, *Navicula* cf. *heimansioides*, *Fragilaria javanica*, *Pinnularia* sp2 y *Eunotia* sp4, relacionados con niveles mayores de fósforo total y menores de sulfatos y materia orgánica, en la Q. Tauramenera.

Gomphonema lagenula y *Pinnularia* aff. *sudetica*, *Eunotia* sp2, *Eunotia* aff. *borealpina*, *Adlafia* sp1, *Surirella* sp1, *Pinnularia subcapitata*, cf. *Fallacia*, *Encyonopsis* sp1, *Encyonopsis* cf. *frecuentis*, *Kobayasiella* spp, *Nupela* aff. *paludigena*, *Frustulia* sp1 y *Frustulia undosa*.

Extracción de material. La relación entre las variables fisicoquímicas y las especies de los ríos con extracción de material mostraron que los tres primeros ejes explicaron el 53,9% de la variabilidad de los especies y la relación de estas con las variables ambientales en un 66.9% (Tabla 7). El modelo seleccionó las variables sílice, pH, fosfatos, velocidad de la corriente, amonio, materia orgánica, sulfatos y turbidez, de estas solo tres tuvieron correlación significativa con las especies, silicio con 24,4%, pH con 18% y fosfatos con 15,1%.

Tabla 7. Resumen estadístico del ACC para alteración por extracción de material. Los ejes 1, 2, 3 y 4 evaluados con el test de Monte Carlo

| | Ejes | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Valores propios | 0.552 | 0.359 | 0.239 | 0.191 |
| Correlación especies - Ambiente | 0.991 | 0.970 | 0.966 | 0.980 |
| % acumulado de varianza de especies | 25.9 | 42.7 | 53.9 | 62.8 |
| % acumulado de varianza de relación ambiente - especies | 32.1 | 53.0 | 66.9 | 78.0 |

Los morfotipos hallados en los ríos se distribuyen en tres grupos, el primero de ellos se asoció a valores más altos en fosfatos, sulfatos, turbidez y velocidad de la corriente donde se ubican las muestras de los ríos Cusiana y Caja en el periodo de lluvias. Algunos de los taxones relacionados fueron: *Adlafia* sp1, *Pinnularia subcapitata*, *Nitzschia valdestriata*, *Gomphonema pumilum*, *Ulnaria* sp1, *Amphora* sp1, *Nupela* sp3, *Gomphonema* sp3, *Eunotia* sp6, *Naviculadicta* sp3, *Mayamaea* sp1, *Sellaphora* sp1, *Navicula* aff. *seminulum*, *Eunotia* cf. *vixexigua*, *Luticola* cf. *muticoides*, *Surirella* sp1, *Navicula* sp2, *Gomphonema parvulum*, *Navicula*

symmetrica, *Eolimna* spp, *Luticola goeppertiana*, *Nitzschia* spp, *Eolimna* cf. *subminuscula*, *Achnanthydium minutissimum* y *Naviculadicta nanogomphonema*.

El segundo grupo se encontró asociado a mayores valores de pH, amonio y materia orgánica correspondiente con las muestras del periodo de sequía de los ríos Caja y Cusiana. Los taxones que formaron este grupo fueron: *Navicula rostellata*, *Nupela* sp4, *Caloneis* sp1, *Navicula cryptotenella*, cf. *Adlafia*, *Pinnularia* sp4, *Eunotia parasiolii*, *Planothydium* cf. *biporum*, *Reimeria sinuata*, *Nitzschia* sp1, *Gomphonema parvulum*, *Gomphonema* sp7, *Fragilaria* sp1, *Placoneis* aff. *opportuna*, *Gomphonema* sp6, *Naviculadicta* sp1, *Navicula* cf. *cryptocephala*, *Nupela subpallavicinii*, *Cymbella* sp1, *Geissleria decussis*, *Ulnaria ulna*, *Diademesis confervacea*, *Nitzschia* cf. *alpinobacillum*, *Cymbella turgidula*, *Cymbella tumida*, *Gyrosigma* cf. *acuminatum*, *Cocconeis placentula*, *Stenopterobia* sp3, *Pinnularia* sp5, *Fragilaria* cf. *vaucheriae*, *Gomphonema* sp1, *Gomphonema* sp8, *Encyonema* sp2, *Encyonema* sp3, *Encyonema silesiacum*, *Encyonema lange-Bertalotti* y *Frustulia* sp1.

Cuando los valores de las variables arriba señaladas disminuyen los valores de sílice van en aumento, se establece un tercer grupo de morfotipos que se relacionan con las muestras del R. Chitamena. Los taxones presentes fueron: *Sellaphora pupula*, *Eunotia* sp5, *Eunotia* sp2, *Eunotia* cf. *subrobusta*, *Rhopalodia* aff. *gibberula*, *Nitzschia* sp2, *Luticola* aff. *costei*, *Sellaphora* sp2, *Geissleria neotropica*, *Fragilaria goulardii*, *Encyonema* cf. *simile*, *Gomphonema lagenula*, *Navicula nota*, *Navicula* cf. *heimansioides*, *Craticula* cf. *submolesta*, *Gomphonema* cf. *neonasutum*, *Sellaphora* sp2, *Placoneis* sp1, *Placoneis* sp2, *Navicula* sp1, *Surirella* sp3, *Gomphonema costei*, *Encyonopsis* cf. *frequentis*, *Neidium* sp1, *Placoneis symmetrica*, *Craticula* sp3, *Gomphonema* sp5, *Pinnularia* aff. *divergentissima*, *Encyonema* aff. *angustecapitatum*, *Nupela acaciensis* y *Pinnularia* cf. *subcapitata* (Figura 16).

diminuyendo las formas adnadas y manteniendo estable la formas moviles. Entre los puntos de referencia y alteración no se observó un patron en la variación.

Las diatomeas presentaron diferentes tamaños en todas las quebradas. Sin embargo, fueron predominantes la clase 2 (100 y 299 μm^3) y clase 3 (300 y 599 μm^3). La variación se dió en periodo seco con un incremento en el biovolumen por aumento de especies más grandes correspondientes a la clase 5 (>1500 μm^3).

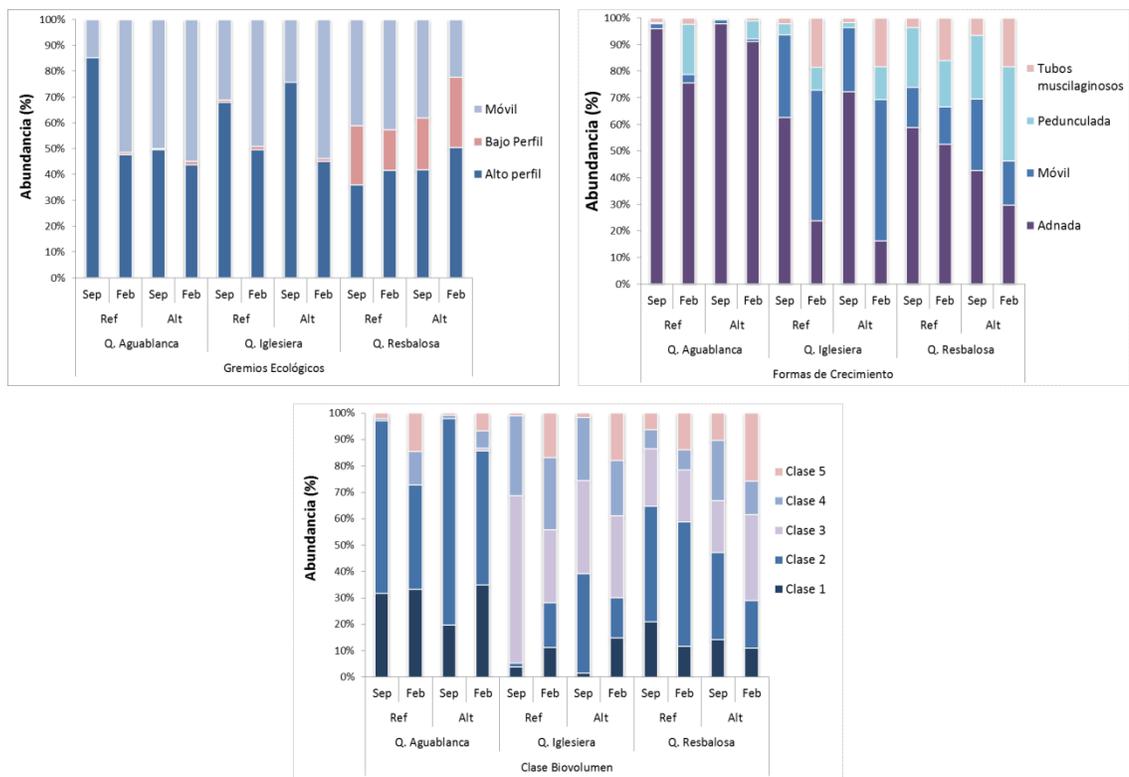


Figura 17. Proporción de rasgos biológicos en las quebradas con alteración con ganadería

Extracción de Caudal. Predominó el gremio móvil y de alto perfil debido a la dominancia de especies del género *Eunotia*, *Nupela* y *Surirella*, la presencia del gremio de bajo perfil fue incipiente. Durante el periodo sequía y en los puntos alterados se observó incremento del gremio móvil, a excepción de la Q. Mata de

los Cajuches donde los gremios móviles y de alto perfil fueron más estables temporalmente y espacialmente (Figura 18).

Las diatomeas adnadas dominaron en todos los puntos y en codominancia de formas de crecimiento móvil en la Q. Mata de los Cajuches y Q. Tauramenera, con cantidades muy bajas de formas pedunculadas y de tubos mucilaginosos. En la Q. Limonera las formas móviles fueron las predominantes. No se observó un patrón de variación entre periodos hidrológicos y la alteración.

Los taxones presentes en la Q. Mata de los Cajuches y Q. Tauramenera se agruparon en su mayoría en el biovolumen de clase 2 (100 y $299 \mu\text{m}^3$), con baja abundancia de otros tamaños. En la Q. Limonera aunque fue importante en proporción los organismos de biovolumen clase 2, en el punto con la alteración se destaca la presencia de una mayor abundancia de organismos de la clase 5.

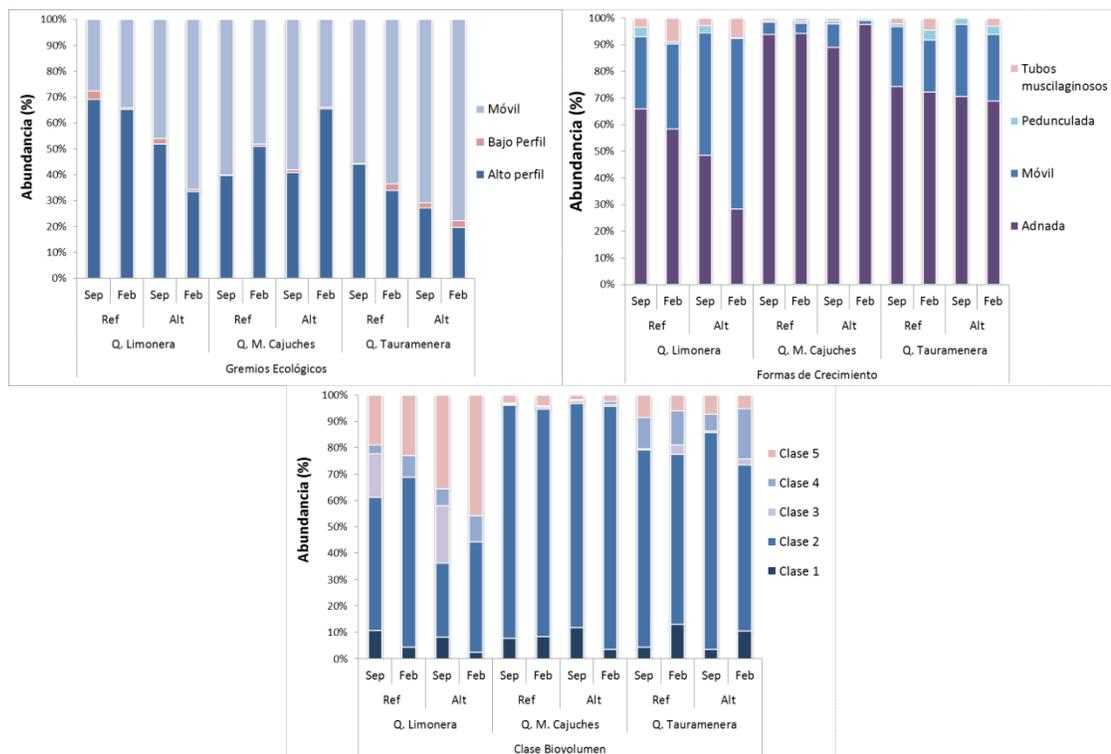


Figura 18. Proporción de rasgos biológicos en las quebradas con extracción de caudal.

Extracción de material. Cada sistema presentó una distribución muy diferente en la abundancia de los gremios ecológicos, sin embargo dominaron los gremios alto perfil y móvil, representados en la abundancia del género *Encyonema* y las especies móviles *Navicula*, *Nitzschia* y *Eolimna*. La variación estacional se dio en el R. Cusiana donde el gremio de bajo perfil ocupó una fracción importante de la biomasa durante periodo seco, mientras que en el R. Caja lo hicieron las especies móviles. No se observaron cambios drásticos entre los puntos con y sin alteración.

Las formas de crecimiento también presentaron un comportamiento particular en cada río. Las formas móviles fueron dominantes en el R. Caja y el R. Cusiana en el periodo lluvioso, con mayor distribución de los demás gremios en sequía, donde las formas pedunculadas y mucilaginosas presentar una mayor proporción. El R. Chitamena se caracterizó por la presencia de diatomeas formadoras de tubos y de gremio móvil con escasa variación estacional (Figura 19).

El biovolumen en los ríos se concentró en pequeñas diatomeas de clase 1 y 2 con valores menores a $300 \mu\text{m}^3$, estacionalmente se observó un incremento de los individuos de la clase 3 y 5 durante el periodo de sequía. La extracción de material no produjo cambios drásticos en los patrones del biovolumen de las algas.

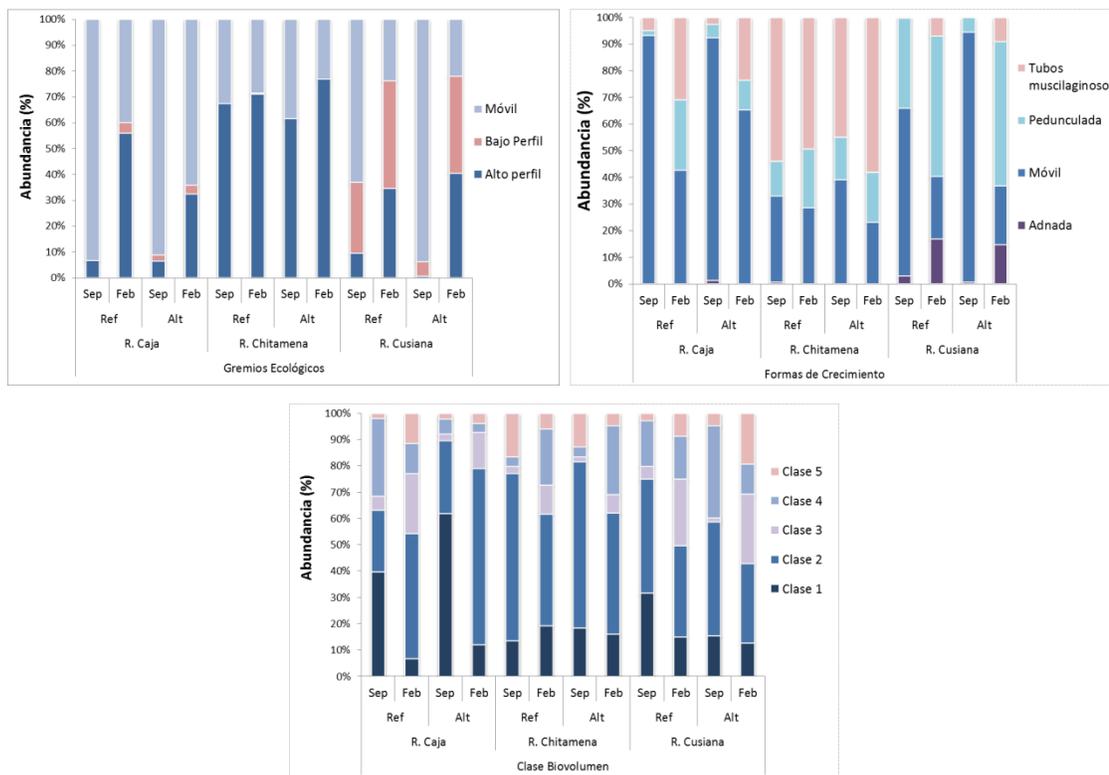


Figura 19. Proporción de rasgos biológicos en los ríos con extracción de material

9.4.1. Diversidad de rasgos biológicos

Al analizar la diversidad de rasgos biológicos se encontraron valores bajos de índice de Shannon tanto para los gremios, formas de crecimiento y biovolumen, lo que permite inferir que entre uno o dos rasgos dominan los ecosistemas en cada periodo. Los mayores cambios en los rasgos se evidenciaron estacionalmente. En relación con las alteraciones los cambios más evidentes fueron: en las quebradas con ganadería y en los ríos donde los valores de diversidad de los gremios y del biovolumen fueron mayores en sequía, mientras que por alteración la diversidad fue mayor para las formas de crecimiento en los puntos con alteración. Los valores de diversidad para las quebradas con extracción de caudal no presentaron variaciones significativas (Tabla 8).

Tabla 8. Promedio del índice de diversidad de Shannon (H') para los rasgos biológicos por periodo climático y punto en cada tipo de alteración.

| Tipo de alteración | Rasgo | Lluvias | Sequía | Referencia | Alteración |
|------------------------|--------------------|---------|--------|------------|------------|
| Ganadería | Gremios ecológicos | 0,74 | 0,83 | 0,77 | 0,80 |
| | Forma crecimiento | 0,87 | 0,82 | 0,69 | 1,0 |
| | Biovolumen | 1,06 | 1,40 | 1,20 | 1,26 |
| Extracción de Caudal | Gremios ecológicos | 0,71 | 0,68 | 0,71 | 0,69 |
| | Forma crecimiento | 0,63 | 0,63 | 0,63 | 0,61 |
| | Biovolumen | 0,87 | 0,84 | 0,86 | 0,85 |
| Extracción de Material | Gremios ecológicos | 0,50 | 0,81 | 0,71 | 0,60 |
| | Forma crecimiento | 0,89 | 0,78 | 0,62 | 1,05 |
| | Biovolumen | 1,15 | 1,36 | 1,32 | 1,19 |

9.3.2. Composición de los rasgos biológicos por alteración y periodo climático

Ganadería. El dendrograma de similitud de Bray-Curtis para los gremios ecológicos mostró que las corrientes tuvieron una similitud superior al 68%. El análisis discriminó tres grupos, cada uno estuvo conformado por las muestras de una quebrada. En el grupo de la Q. Resbalosa se presentó una tendencia de segregación entre las muestras de referencia y las de los puntos alterados, las demás corrientes lo hicieron por estacionalidad. Las formas de crecimiento y el biovolumen también señalaron diferencias en los rasgos de la comunidad de diatomeas según la alteración en la Q. Resbalosa. La Q. Iglesias presentó para todos los rasgos una segregación estacional. La prueba estadística ANOSIM no mostró diferencias significativas entre los rasgos biológicos de las diatomeas por alteración ni por periodo hidrológico ($p > 0.05$) (Figura 20)

Extracción de Caudal. La prueba estadística ANOSIM no mostró diferencias significativas entre los rasgos biológicos de las diatomeas en las quebradas seleccionadas para estudiar la extracción de caudal ($p \Rightarrow 0.05$), por alteración ni por periodo hidrológico. Sin embargo a partir de los dendrogramas de similitud de Bray-Curtis se pudo establecer que la Q. Limonera y la Q. Tauramenera presentaron diferencias en los gremios y formas de crecimiento entre el punto de referencia y alterado, mientras que la Q. Mata de los Cajuches presentó una segregación más estacional

Extracción de material. El análisis de similitud de Bray – Curtis señaló para todos los rasgos biológicos de la comunidad de diatomeas una tendencia estacional en cada río, la alteración de extracción de material pétreo no causó mayores cambios en los rasgos de la comunidad de diatomeas como la ratifica el análisis estadístico (ANOSIM $p \Rightarrow 0.05$) (Figura 20)

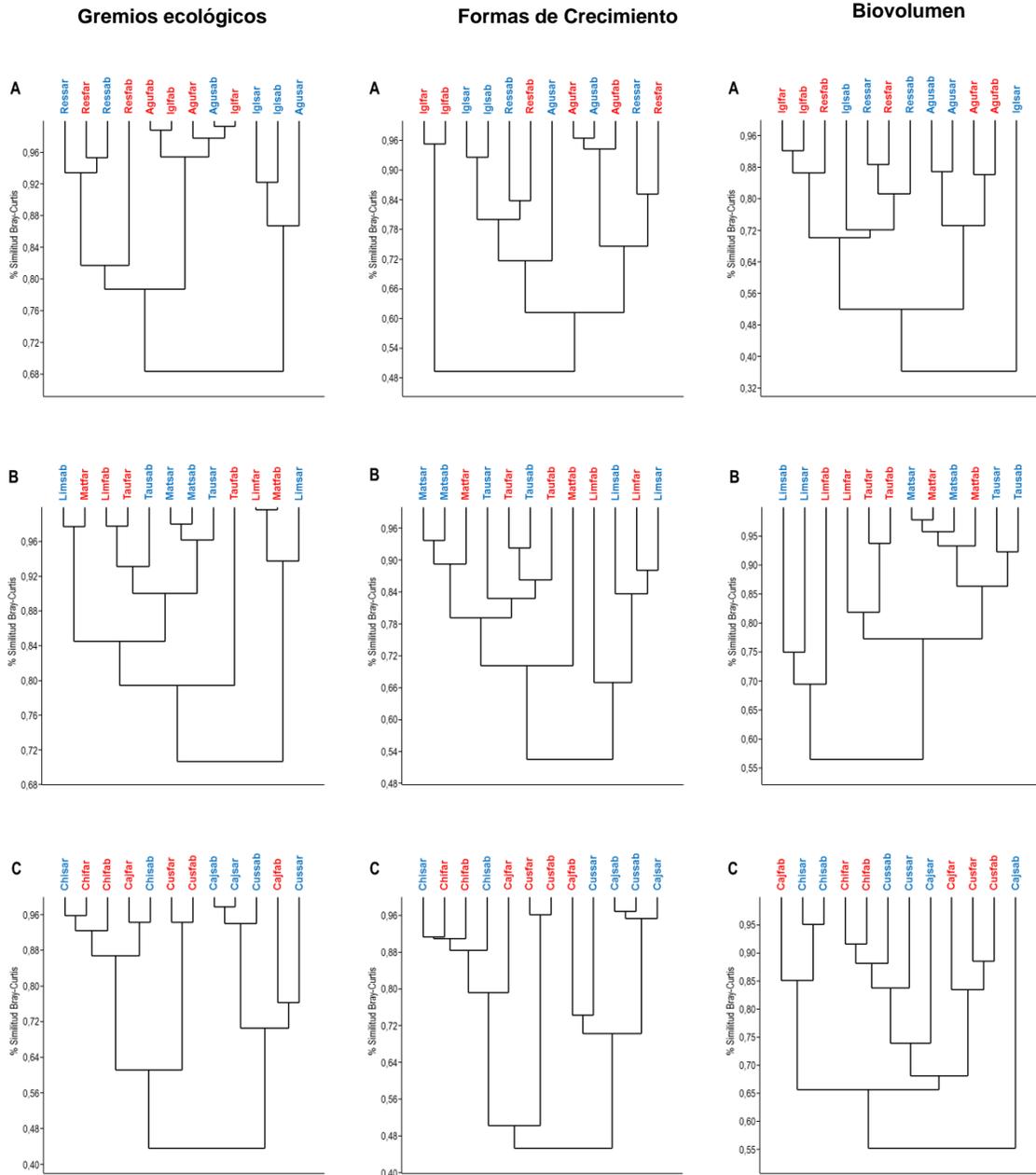


Figura 20. Gráficas de similitud de Bray-Curtis entre los rasgos biológicos de todas las corrientes por tipo de alteración. Ganadería (A), extracción de caudal (B) y extracción de material (C). Texto azul (lluvias), texto rojo (sequía).

9.4.2. Relaciones entre los rasgos biológicos de diatomeas y las variables físicas y químicas

Ganadería. La relación entre los rasgos biológicos de las diatomeas con las variables ambientales se analizó a partir del Análisis de Redundancia (RDA). Para los gremios ecológicos, los tres primeros ejes explicaron un 94.5% de la variabilidad, los parámetros que se correlacionaron significativamente en el modelo fueron fósforo total (34%) y conductividad (10,6%), otras variables seleccionadas fueron dureza, temperatura y amonio. La conductividad se correlacionó positivamente con el gremio móvil, pero negativamente con el gremio de alto perfil, asociado a valores más altos de fósforo total y sílice. El gremio bajo se relacionó con valores menores de dureza y fósforo total, este gremio fue exclusivo de la Q. Resbalosa. Las muestras de temporada de sequía y algunos puntos con alteración se asociaron al gremio móvil, mientras que los de época lluviosa con el de alto perfil (Figura 21).

En el RDA para las formas de crecimiento los tres primeros ejes explicaron un 75,8% de la variabilidad de las especies. La dureza fue la única variable significativa (68,4%), que junto con el amonio se correlacionaron positivamente con las formas mucilaginosas y negativamente con las formas adnadas. La materia orgánica y la velocidad de la corriente se correlacionan con especies móviles y los fosfatos con las formas pedunculadas. En la distribución de los puntos se observó que se agruparon por alteración, los puntos alterados se asociaron a las formas pedunculadas y tubos mucilaginosos y los puntos de referencia a las formas adnadas.

Extracción de Caudal. El RDA para los gremios ecológicos explicó la varianza de las especies en un 97.4% con los tres primeros ejes del modelo. Las variables significativas fueron pH (24,7%), velocidad de la corriente (23,7%) y fósforo total (14,4%), que se correlacionaron positivamente con el gremio móvil y negativamente con el gremio de alto perfil. Las variables turbidez, dureza y hierro estuvieron correlacionadas positivamente con el gremio de bajo perfil. Según el análisis se presentó una tendencia a que la comunidad de diatomeas del gremio móvil fue dominante en los puntos con la alteración.

Para las formas de crecimiento, el modelo explicó en sus tres primeros ejes el 72,6% de la varianza, la única variable significativa en el análisis fue el amonio (46,5%), que junto con los sólidos suspendidos totales se correlacionaron positivamente con formas mucilaginosas, y a su vez se correlacionan negativamente con las formas pedunculadas y adnadas, mientras que las formas móviles se correlacionan con la velocidad de la corriente. Los puntos con alteración se encontraron asociados a las formas adnadas y formadoras de tubos mucilaginosos, mientras que las formas pedunculadas y móviles se encontraron relacionadas con los puntos de referencia (Figura 21).

Extracción de material. El RDA mostró que los tres primeros ejes explicaron un 97% de la variación de las especies. El modelo seleccionó las variables temperatura, fosfatos, turbidez, sodio, sílice, amonio, velocidad de la corriente, materia orgánica y sulfatos, de las cuales cinco tuvieron correlación significativa: temperatura (48.4%), fosfatos (22,6%), turbidez (12,3%), sodio (8,2%) y sílice (6,1%). La correlación positiva se dio entre los fosfatos y la turbidez con el gremio móvil que se relacionó con el periodo lluvioso, sílice y amonio se correlacionaron con el gremio de alto y bajo perfil donde se ubicaron varios puntos de temporada de sequía.

Los tres primeros ejes explicaron un 92,1% de la varianza en las especies según forma de crecimiento con solo una variable con significancia magnesio (47,8%). Las variables calcio, sólidos suspendidos totales y el magnesio se correlacionaron positivamente con la forma adnada, donde tienden a agruparse algunos puntos de referencia. Las formas móviles se encontraron asociadas al pH y la velocidad, las formas pedunculadas al hierro. Los puntos de referencia se encontraron distribuidos entre las formas pedunculadas y tubos mucilaginosos (Figura 21).

9.5. SÍNTESIS DE RESULTADOS



Figura 22. Síntesis de resultados

10. DISCUSIÓN

10.1. PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS DE LAS CORRIENTES DEL MUNICIPIO DE TAURAMENA

Las corrientes estudiadas presentaron una dinámica en sus características físicoquímicas propias de la región de la Orinoquía, reflejando la influencia de factores como el clima, la geomorfología, la geoquímica en la caracterización ambiental del ecosistema acuático (Mora *et al.*, 2007, Rivera *et al.*, 2010). Los sólidos totales, la turbidez y la conductividad aumentan progresivamente a medida que se desciende altitudinalmente, de ahí la diferencia entre quebradas y ríos, debido a los aportes de material proveniente de los suelos y al material orgánico producto del arrastre de sedimentos por escorrentía, aportes de material alóctono (Vannote *et al.*, 1980), al uso de la tierra o de las actividades económicas que se desarrollan en la región.

En la cuenca del Río Orinoco los suelos han sufrido disminución en su composición mineralógica y empobrecimiento debido a procesos de intemperización y lavado, con lo que variaciones en el clima como en época lluviosa, hace que se pierdan pocos elementos solubles e intercambiables con los suelos (Malagón, 2003) y en consecuencia se presente mayor acidez y bajo contenido de nutrientes en las corrientes de agua (Rivera *et al.*, 2010). Los valores de pH registrados, ácidos a circumneutros en los ríos están confirmando por la composición diatomológica, pues las especies dominantes resultan ser acidófilas o tolerantes a amplios rangos de variación en el pH (Kovács *et al.*, 2006).

Pese a que las corrientes son muy pobres en nutrientes, en concordancia con lo hallado por (Rivera *et al.*, 2010), y por lo tanto tienden a baja productividad, el periodo de sequía mostró fuerte correspondencia con el contenido de clorofila-a que implica un aumento en la producción de biomasa. Dado que la clorofila-a no

es un pigmento fotosintético exclusivo de las diatomeas pues es común a todos los grupos de algas presentes en el perifiton, esta respuesta en la biomasa ha sido atribuida al incremento de algas verdes filamentosas y a las cianofíceas más que a las diatomeas (Stevenson *et al.*, 2006). El incremento en la producción primaria se puede vincular a la influencia del régimen de precipitaciones sobre la regulación del caudal (Martínez & Donato, 2003) y (Zapata & Donato, 2005), que por efecto de la disminución en la turbulencia y turbidez permiten mejor adhesión algal, estabilidad del sustrato y mayor disponibilidad en la cantidad de luz, o bien por la concentración de nutrientes. La alcalinidad también pudo desempeñar un papel importante en la actividad fotosintética pues este periodo presentó valores mayores lo que redundaba en una mayor disponibilidad de carbono, aun así la alcalinidad en estos cuerpos de agua es muy baja lo que las hace susceptibles por la pobre capacidad amortiguadora (Rivera *et al.*, 2010).

La distribución de los puntos de muestreo en todas las corrientes evidenció un comportamiento estacional en la química del agua influenciados por la dinámica hidrológica de acuerdo con lo expresado por Rivera *et al.*, (2010) para ecosistemas de la Orinoquía. La disminución de la conductividad durante el periodo de lluvias se relaciona con un mayor flujo de agua en el cauce que diluye las formas iónicas presentes y que incrementa el oxígeno disuelto debido a una mayor turbulencia en las aguas (Allan & Castillo, 2007). Aunque en términos generales los valores de sólidos suspendidos totales son bajos, en los ríos la influencia hidrológica los pudo incrementar ligeramente en el arrastre de material de la cuenca por escorrentía superficial que modificó la turbidez del agua, siendo mayor en todas las corrientes durante el periodo lluvioso, influencia que también se puede evidenciar en el incremento de los sulfatos quizás como resultado de la descomposición de las hojas que caen en la corriente o del lavado de los compuestos minerales de las rocas.

En cuerpos de agua naturales las actividades antrópicas son principales causantes del enriquecimiento de nutrientes y la consecuente eutrofización de las corrientes (Hering *et al.*, 2006), la ganadería es una de las actividades que pueden potenciar estos procesos y más en sistemas oligotróficos que parecen ser más susceptibles al aporte de nutrientes alterando la composición de la comunidad de diatomeas (Veraart *et al.*, 2008). Sin embargo no se encontraron cambios significativos en los valores de la química del agua en las quebradas afectadas con pastoreo de ganado, posiblemente la presencia de vegetación riparia pudo funcionar como barrera o cerca natural impidiendo el ingreso de los animales directamente al cauce, o bien como lo describe Burt *et al.* (2013) para mitigar o amortiguar la entrada de nutrientes al agua debido a la capacidad de filtración, lo que condujo a que no se diera el enriquecimiento esperado.

Por otra parte, las alteraciones hidrológicas dadas por la extracción agua de los lechos fueron más evidentes en el cambio de estacionalidad que entre los puntos con y sin extracción de caudal, estas observaciones coinciden con otros estudios donde los efectos de la disminución del flujo en los ensambles de algas solo fueron aparentes durante la estación seca con reducciones en la descarga y la velocidad de la corriente o cambios en los nutrientes (Tang *et al.*, 2013), por lo que se deduce que el porcentaje de reducción del flujo de agua sobretodo para periodo de sequía no supero el umbral de los niveles críticos para el mantenimiento de la la flora diatomológica, que según el mismo estudio sería de un tercio del caudal natural.

Licursi & Gómez (2009) establecen que dentro de las consecuencias que se pueden presentar debido a la extracción de material del lecho de los ríos se incluyen la desestabilización del sustrato, cambios en la columna y en la química del agua por incremento de sólidos suspendidos, turbidez y nutrientes. Esta constituía la predicción para los ríos con esta actividad en su lecho, no obstante, los hallazgos indican que estas variaciones en la química del agua no se

manifiestan en los puntos alterados y es posible que el proceso de resuspensión de la carga de sedimentos fue rápido y no consiguió impactar drásticamente las comunidades aguas abajo de la intervención. Adicionalmente, el orden y el origen de los ríos Cusiana y Chitamera hacen que sean naturalmente turbios por lo que la diatomoflora establecida puede estar acoplada a estas condiciones de turbiedad. Las alteraciones antrópicas estudiadas en este documento no muestran cambios sustanciales sobre la química del agua, lo cual nos lleva a que quizás el impacto de estas actividades no fue lo suficientemente fuerte como para alterar su composición química.

10.2. COMPOSICIÓN DE LA COMUNIDAD DE DIATOMEAS

Las flora diatomológica de las quebradas con alteración con ganadería y extracción de caudal fue similar, lo que fue probablemente debido a factores naturales como las características geológicas y geográficas similares. De acuerdo con Tison *et al.* (2005), la geología y el relieve parecen jugar un papel importante en la estructuración de la variabilidad natural de las comunidades de diatomeas. Las diferencias fueron claramente entre la estructura de la comunidad de diatomeas de ríos y quebradas, aquí aparte de los factores anteriormente mencionados cabe además la influencia del orden de los ríos que según Stenger-Kovács *et al.* (2014) juega un papel muy importante en el establecimiento de las comunidades, puesto que los ensamblajes algales aguas abajo normalmente tienen más y variadas fuentes de colonización que las comunidades de aguas arriba (Molloy, 1992).

Mientras que los cambios en el ensamblaje de diatomeas entre los puntos de referencia y los alterados no fueron evidentes, los cambios en el ensamblaje por estacionalidad muestran algunas diferencias, con mayor número de especies en sequía. En las quebradas este incremento en la riqueza puede ser explicado por el hecho de que estas especies que aparecen en sequía son en su mayoría de talla

alta y móviles que pueden aprovechar mejor los recursos disponibles y tendrán baja exposición a la fricción del agua (Passy, 2007a). Los ríos por su parte mostraron aumento en la riqueza durante periodo seco pero con especies formadoras de mucilago, tubulares y móviles. Según Hill (1996) la luz es un factor muy importante en la definición de la comunidad de diatomeas, por lo que estas pueden favorecerse explorando la estructura vertical de la columna de agua, de allí que aprovechando la disminución en la turbidez y una mejor penetración de luz aparecen o se incrementan especies de los géneros *Cymbella*, *Encyonema* y *Navicula*.

En el grupo de quebradas, la familia Eunotiaceae presentó la mayor representatividad con *Eunotia parasiolii*, su distribución se observó determinada por las variables químicas del agua. Una amplia diversidad del género ha sido reportado en áreas tropicales donde *Eunotia* se asocia frecuentemente con ambientes oligotróficos, con baja presión antrópica, en aguas con valores bajos de pH y conductividad (Sala *et al.*, 2002). De igual forma, las especies encontradas del género *Nupela* como codominante son consistentes con los reportes para otras partes del mundo donde se han encontrado en aguas de pH neutro a ácido y baja conductividad (Spaulding & Edlund, 2008). En el ensamblaje de las quebradas con extracción de caudal un incremento en la abundancia del género *Surirella* se presentó en los puntos con alteración donde presentaron las menores lecturas en el caudal, esta respuesta pudo ser debida a la capacidad que tiene este género de colonizar ambientes de baja velocidad de corriente, donde según Margalef (1983) se pueden acumular sedimentos finos que le permiten desplazarse más eficazmente.

En el grupo de corrientes con alteración por ganadería se encontraron asociadas al gradiente de sulfatos y sílice con la presencia de las especies dominantes del género *Eunotia parasiolii* durante época lluviosa, *Nupela* y *Brachysira brebissonni*, esta última, de acuerdo con Hamilton (2010) comparte este hábitat por su afinidad

con aguas de pobre alcalinidad y su tolerancia a ambientes ácidos, además se encontraron especies del género *Surirella* y *Nitzschia* que son comunes en aguas ácidas pero moderadamente ricas en materia orgánica y con mayor conductividad (Sala *et al.*, 2013).

En los ríos, la estructura de la diatomoflora fue dominada por la familia Cymbellaceae, cuya abundancia parece ser favorecida por ambientes oligotróficos (Leira, *et al.*, 2009), la especie más abundante fue *Encyonema* cf. *simile* en periodo seco, que según Berthron *et al.*, (2011) debido a su capacidad de formar tubos mucilaginosos son abundantes cuando la contaminación orgánica y el nivel trófico son bajos. La codominancia en los puntos con alteración y durante periodo seco de *Nitzschia* spp puede estar dada por la tolerancia de este género a una amplia gama de condiciones ambientales y a entornos donde los materiales en suspensión se acumulan en zonas fluviales de baja velocidad y pueden ser colonizados por algas con movimiento de deslizamiento lento como *Nitzschia* y *Surirella* y *Navicula* (Margaléf, 1983).

Especies abundantes durante periodo de lluvias y en los puntos alterados con extracción de material como *Eolimna* spp, *Navicula symmetrica* y *Achnanthydium minutissimum* han mostrado preferencia por corrientes con mayor velocidad y turbidez (Hermany *et al.*, 2006, Michels *et al.*, 2006). Adicionalmente, *Achnanthydium minutissimum* es un colonizador pionero, ya que es una especie con una fuerte capacidad de unión al sustrato y una tasa de crecimiento rápida (Ponader & Potapova, 2007), lo que hace suponer que las perturbaciones de arrastre asociadas con alto flujo y el movimiento de sedimentos durante este periodo pueden alterar la comunidad restableciéndola en una etapa de sucesión "pionera" (Biggs, *et al.*, 2005). Por otro lado en el periodo de sequía asociado a una reducción en la velocidad de la corriente y con más altos niveles de pH y amonio, aparecen especies que en consonancia con lo expuesto por Hermany *et al.*, (2006) responden mejor a bajas velocidades, como lo son *Cocconeis*

placentula, *Cymbella turgidula*, *Cymbella tumida* y *Gomphonema lagenula* (Ramírez & Plata, 2008), especialmente las especies cymbeloides que debido a la débil estructura de fijación son susceptibles al desprendimiento y arrastre

10.3. RESPUESTA DE LA COMUNIDAD ANTE LAS ALTERACIONES Y LOS PERIODOS HIDROLÓGICOS

La ubicación de las corrientes en el piedemonte hace que persista el grado en la pendiente y que haya una mayor velocidad del agua, esto sumado a que son ambientes con baja cantidad de nutrientes produce aumento en la competencia entre los organismos por los recursos y limita la disponibilidad de nicho para el establecimiento de un número mayor de algas, de allí que las quebradas presenten valores más bajos en cuanto a riqueza y diversidad con respecto a los ríos, puesto que como algunos estudios han mostrado, la mayores índices de riqueza y diversidad de especies de diatomeas se encontraron en sitios con niveles intermedios de enriquecimiento (Jüttner *et al.*, 1996) y de disturbio (Connell, 1978). En adición, el carácter ácido de las corrientes también ha mostrado efectos en la disminución de la riqueza (Stokes 1986). La similitud en la comunidad de diatomeas de la Q. Iglesias con los ríos puede obedecer a que es una corriente de mayor orden con un mayor caudal, profundidad y velocidad de la corriente, además de ser una corriente con mayor turbidez con respecto a las quebradas.

Valores similares en los índices de diversidad han sido reportados para ambientes lóticos (Ramírez & Plata, 2008, Rivera *et al.*, 2010 y Pedraza & Donato 2011), además los índices de diversidad en las quebradas reflejan baja dominancia con valores medios de equitabilidad, que indica que la comunidad estuvo bien representada en algunos morfotipos, posiblemente debido a la oligotrofia.

Factores asociados al régimen hidrológico como el cambio en la velocidad y la cantidad de flujo pueden influir en la estructura, distribución y sucesión de la comunidad de diatomeas (Zapata & Donato, 2005). Variaciones encontradas en la riqueza y la diversidad en las corrientes con ganadería y extracción de material durante los periodos climáticos pueden estar dadas por el incremento en la precipitación, estas perturbaciones de arrastre asociadas con alto flujo y el movimiento de sedimentos puede generar un mayor arrastre del lecho derivando en el desprendimiento y la pérdida de biomasa algal (Yang *et al.*, 2009). Por otro lado, la diferencia en la composición de la comunidad a lo largo del tiempo debido a las diferencias en la riqueza de especies podría ocurrir si la mayoría de las especies muestran una respuesta negativa similar a la perturbación, donde solo hay unas pocas especies son resistentes (Schneck *et al.*, 2017).

Los cambios relacionados con la perturbación en la composición de las especies en el periodo seco pudieron resultar del reemplazo de especies (Schneck *et al.*, 2017). El reemplazo de especies pudo ocurrir por organismos oportunistas, donde algunas especies que no estaban presentes en la comunidad antes de la perturbación podrían haber ocupado el espacio recién abierto como resultado de la pérdida de especies previamente establecidas o por el reemplazo de especies sensibles por especies más tolerantes. Se observó que en las quebradas la presencia exclusiva de taxones abundantes en el periodo seco, como la Q. Iglesiera con 5 taxones, Aguablanca con 4, Resbalosa con 3 y en los ríos: Chitamena 3 taxones, Cusiana 5, y Caja 6. Este incremento en la riqueza probablemente estuvo dado por el dominio de taxones con menor resistencia a las perturbaciones y tasas de inmigración y/o crecimiento mucho más lentas (estrategias C y S) (Biggs *et al.*, 1998) que tal vez llegaron desde refugios más distantes pero que pueden ser más sensibles al suministro de recursos.

En ambientes pobres en nutrientes y de mayor altitud donde la producción autotrófica actúa como un componente de menor magnitud en relación con la

producción heterotrófica, variaciones en la concentración de nutrientes pueden generar cambios en la estructura y composición de las asociaciones algales, dada la homogeneidad en las características ambientales entre los puntos con y sin alteración antrópica Passy (2008) apunta a dar mayor relevancia a la tolerancia y el posicionamiento espacial que deben tener las especies de diatomeas para formar una comunidad que aproveche los recursos disponibles bajo perturbación moderada por lo cual cambios en la comunidad pudieron darse por las diferencias entre las corrientes más que por las diferencias entre puntos de referencia y alteración.

La relación entre la composición diatomológica y las variables medio ambientales generadas en el ACC para las quebradas establece una correspondencia entre los sulfatos y la materia orgánica, esta correlación de variables se encuentra menudo corrientes naturales y lagos (Gobran & Clegg, 1992). Posiblemente el aporte de materia orgánica alóctona proveniente de la vegetación riparia, puesto que las quebradas en su mayoría presentaron una buena cobertura de tipo arbustivo, especialmente las quebradas Limonera, Iglesias, Mata de los Cajuches y Resbalosa. La relación entre los sulfatos y la descomposición heterotrófica de la materia orgánica es aún materia de estudio, pero se cree que los sulfatos son un impulsor importante en la biodegradación de la materia orgánica y la dinámica del carbono en el agua (Ledesma *et al.*, 2017). Esta relación pone de manifiesto que la comunidad de diatomeas en las quebradas se ajusta según las características físicas de la cuenca como lo son la cobertura, el ingreso de materia orgánica y la dinámica de iones en el agua.

En los ríos las variables significativas halladas en el ACC muestran un gradiente entre los fosfatos con el pH y sílice. La concentración de nutrientes, particularmente el fósforo, aumentan con el desarrollo urbano, la agricultura y se asocian con la escorrentía de aguas pluviales (Bere & Tundisi, 2010).

10.4. RASGOS BIOLÓGICOS DE DIATOMEAS

La composición de los gremios ecológicos en las corrientes mostró codominancia del gremio de alto perfil y móvil. Las diatomeas de alto perfil responden mejor en ambientes con disponibilidad de nutrientes y presentan baja resistencia a la perturbación (Passy, 2007a). Dadas las condiciones ácidas y por ende pobres en nutrientes de las quebradas los resultados no son consistentes con esta premisa. En las quebradas quizás fue debido a la acidez del agua, puesto que la presión de herbivoría tiende a disminuir conforme desciende el pH (Stokes, 1986), esto probablemente benefició a los taxones de alto perfil de la capa superior de la comunidad perifítica que se hayan más expuestos a la herbivoría (Steinman, 1996).

Las diferencias estacionales en las quebradas donde las diatomeas móviles son más abundantes en sequía, se deben a que pueden competir por los recursos de forma eficaz al desplazarse horizontal y verticalmente dentro del biofilm en busca de hábitats más adecuados (Consalvey *et al.*, 2004), asimismo se pueden beneficiar de la baja perturbación y la baja velocidad del agua durante este periodo pues aunque son más vulnerables al arrastre que las especies adnadas su capacidad de migrar puede salvaguardarlas (Schneck & Melo, 2012).

En los ríos los valores de nutrientes son mayores lo que pudo favorecer tanto a las diatomeas móviles como de perfil alto. Lange *et al.* (2011) propone que la luz tiene un efecto mayor que los nutrientes, en la distribución del gremio de alto perfil, puesto que los ríos estaban desprovistos de vegetación riparia boscosa y fueron más turbios en el periodo lluvioso es posible que la entrada de luz haya influido la composición de gremios en estas corrientes. Adicional a esto, los bajos contenidos de carbono orgánico total en sequía parecen correlacionarse con los niveles de luz, ya que la cantidad de luz que ingresa suele ser mayor cuando el contenido de carbono orgánico total es más bajo (Steinberg, 2003).

La asignación por gremios ecológicos estuvo basada en la propuesta de Passy (2007a), sin embargo cuando se observó la forma de crecimiento del género *Eunotia* que aparece como dominante en las quebradas se encuentran formas de crecimiento diversas. *Eunotia* es descrito como un género de células capaces de crecer aisladas, libres, unidas al sustrato por tallos mucilaginosos o en colonias largas (Furey, 2010). Esta variación en las formas de crecimiento puede diferir de las establecidas pues agrupan el género en un solo gremio sin tener en cuenta la diversidad de formas de vida que puede haber dentro de él. Se puede inferir entonces que las métricas a nivel de género no resultan siempre tan precisas como los indicadores de nivel de especie (Stevenson *et al.*, 1999). Por lo tanto, la aplicación de gremios ecológicos para la evaluación del estado ecológico, debe utilizarse con precaución seleccionando preferiblemente en cada gremio organismos a nivel de especie.

Las formas de crecimiento parecen mostrar mejor correlación con las características químicas del agua las corrientes estudiadas. Diatomeas adnadas han sido reportadas en condiciones de bajo contenido de nutrientes disueltos en el agua y alta perturbación (Passy, 2007b), esto parece consecuente con el cambio estacional en el desarrollo de las comunidades algales de acuerdo a su capacidad de respuesta a la disponibilidad de recursos y resistencia a la perturbación. Los cambios observados de acuerdo a la estacionalidad en las quebradas con ganadería y extracción de caudal favorecen la dominancia de formas con buena adherencia al sustrato como *Eunotia* y *Nupella* en periodo lluvioso donde la velocidad de la corriente es mayor barriendo los sustratos y haciéndolos disponibles para la recolonización que es aprovechada por diatomeas que tienen mayor probabilidad de colonizar formadas por taxones con altas tasas de reproducción y capacidad de dispersión (Biggs *et al.*, 1998).

En comparación con el periodo de sequía y la consecuente disminución del disturbio en las quebradas, se reflejó una mejor la distribución en formas de

crecimiento al disminuir la forma adnada dominante *Eunotia parasiolii*. En las quebradas con extracción de caudal no hay recambio de especies, solo un ligero incremento en especies móviles. Mientras que las quebradas con ganadería se encontraron especies nuevas de formas móviles como *Navicula veneta*, *Navicula* cf. *heimansioides*, *Pinnularia pisciculus* var. *angusta* y *Nitzschia* sp1, formas pedunculadas como *Gomphonema archaeovibrio* f. *cuneatum*, *Fragilaria javanica*, y formas con mucilago como *Frustulia* sp1, poniendo de manifiesto que el dominio y recambio de algunas especies de diatomeas está determinado por la influencia del régimen hidrológico (Dodds & Biggs, 2002).

En los ríos la abundancia en periodo lluvioso de diatomeas móviles representadas en los géneros *Navicula*, *Nitzschia* y *Surirella* puede estar dada por el contenido de sustrato fino que se encuentra en el lecho de estas corrientes o al incremento de material proveniente desde partes más altas de la cuenca que motivan la migración de estas especies en busca de nutrientes del sustrato y en el agua subyacente, puesto que se caracterizan por presentar sistemas más avanzados y eficientes para desplazarse a través de los sedimentos, situándose en aguas intersticiales del sustrato que son a menudo ricas en nutrientes y materia orgánica disuelta (Berthon *et al.*, 2011; Passy, 2007), además de su capacidad de excretar enzimas extracelulares que les permiten utilizar macromoléculas absorbidas en sustratos o sedimentos (Pringle, 1990).

La variación de las formas de crecimiento durante el periodo hidrológico puede a su vez estar influida por los cambios en el agua a consecuencia de la variación del caudal que condiciona las especies halladas ya que puede impedir el predominio de ciertas formas de crecimiento (Wang *et al.*, 2009). La abundancia de diatomeas móviles disminuye en sequía en beneficio de formas pedunculadas y formadoras de mucilago como *Cymbella tumida*, *Cymbella turgidula*, *Planothidium* cf. *biporum*, *Gomphonema* sp7 y *Encyonema* cf. *simile*. De acuerdo con Pringle (1990) las formas pedunculadas son mejores para explotar los nutrientes disueltos

en el agua ya que las diatomeas móviles tienden a utilizar nutrientes absorbidos en el sustrato, puesto que en sequía este tiende a reducirse. Mientras que para la aparición de especies con mucilago una posible explicación es el efecto protector de la matriz de exopolisacáridos que les ofrece ventajas en ríos donde hay una mayor carga de sustancias contaminantes.

La composición de formas de vida se encuentra relacionada con el tamaño celular (biovolumen) pues refleja en buena medida las características de resistencia al disturbio y disponibilidad de recursos en las corrientes pues diatomeas pequeñas tienen mayor tolerancia a bajos niveles de nutrientes que las diatomeas de gran tamaño (Wunsam *et al.*, 2002). La dominancia estuvo dada por especies $<300 \mu\text{m}^3$ de volumen, las métricas proveen información interesante puesto que se ve la diversificación del tamaño en el incremento en el biovolumen durante periodo seco a especies con tamaños superiores a los $300 \mu\text{m}^3$. Las especies más grandes en virtud de su mayor altura, obtienen un mejor acceso a la luz y nutrientes de la columna de agua y pueden crear un entorno de disminución de recursos para las especies más pequeñas (Passy, 2007b).

11. CONCLUSIONES

Las condiciones que se imponen en la composición química del agua en ríos y quebradas están dadas en gran medida por la naturaleza geoquímica de la cuenca que no aporta gran cantidad de nutrientes por lo cual hay un bajo contenido iónico. Las variaciones en la fisicoquímica del agua se encontraron más influenciadas por los cambios derivados de los ciclos hidrológicos que por las alteraciones antrópicas estudiadas, lo que pone de manifiesto, por una parte, que el grado de perturbación dada por estas actividades no fue suficiente fuerte para alterar severamente las condiciones ambientales y por otra parte que estos son ecosistemas resilientes que tienen rápida recuperación a eventos antrópicos de baja intensidad.

Fueron identificadas asociaciones de especies de diatomeas relacionadas con las características químicas del agua. En las quebradas cuyos valores de pH fueron bajos, se observaron especies dominantes que se caracterizan por ser acidófilas, como el género *Eunotia* y *Nupella*. En los ríos las especies encontradas no tienen un óptimo de pH aparente pero si mostraron claras estrategias en su forma de vida para aprovechar mejor los recursos disponibles al diversificarse las formas pedunculadas y con capacidad de formar tubos mucilaginosos (*Encyonema*). La influencia de las variaciones estacionales fue observable en la riqueza y la diversidad de especies ya que fue mayor en sequía para las quebradas en ganadería y extracción de material. Si bien dado los cambios es la riqueza de las diatomeas por periodo hidrológico no se puede rechazar totalmente la hipótesis planteada H₁, es decir, la composición de especies en las corrientes estudiados varían por la alteración antrópica y la periodo hidrológico, los resultados matemáticamente no permiten aceptarla.

Los resultados mostraron que la comunidad de diatomeas respondió menos a los cambios derivados de los factores estresores (ganadería, extracción de caudal y

material) que a los de la estacionalidad. Los análisis multivariados permiten concluir a pesar de los cambios hidrológicos que se registraron en las corrientes por el efecto de la estacionalidad climática las diatomeas en las quebradas respondieron a las características físicas del hábitat (porcentaje de cobertura y volumen de materia orgánica gruesa) y a micronutrientes como Magnesio, Sodio y los sulfatos, mientras que en los ríos las diatomeas respondieron estacionalmente a variables químicas del agua como pH y a nutrientes como los fosfatos y el sílice. Mecanismos de distribución de la comunidad de diatomeas incluyen el recambio de especies por otras oportunistas o algunas de mayor tolerancia.

Los rasgos biológicos de las diatomeas respondieron a las características espaciales de las corrientes, lo que nos permite dar cuenta del estado de los ecosistemas acuáticos a un nivel más amplio, mientras que las variaciones dentro de un mismo riachuelo o río, no mostraron cambios significativos en el ensamblaje. Por lo tanto se rechaza tanto la hipótesis H₂ como la hipótesis H₃ puesto que los datos encontrados no reflejan cambios significativos en los rasgos biológicos de las diatomeas por alteración, ni por periodo hidrológico.

De los rasgos utilizados los que menor correlación mostraron con la dinámica de las corrientes fueron los gremios ecológicos. La afiliación gremial al agrupar géneros dentro de un gremio deja por fuera algunas preferencias o estrategias que tienen ciertas especies dentro de un mismo género. Esta métrica no mostro sensibilidad en estas corrientes, mientras que las formas de crecimiento y el biovolumen tuvieron mejor desempeño al ser rasgos con parámetros más diversos que involucran mayor diferenciación de formas de vida y su asociación con la preferencia de nutrientes y luz, además de su resistencia a la perturbación.

12. BIBLIOGRAFÍA

- Alcaldía de Tauramena. (2012). *PLAN INTEGRAL DE DESARROLLO MUNICIPAL 2012-2015*. Alcaldía de Tauramena - Casanare.
- Allan, D. (2004). Landscapes and Riverscapes: The Influence of Land Use on Stream Ecosystems. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.*, 35, 257–84.
- Allan, D., & Castillo, M. (2007). *Stream Ecology Structure and Function of Running Waters* (Segunda ed.). The Netherlands: Springer.
- Bere, T., & Tundisi, J. G. (2010). Biological monitoring of lotic ecosystems: the role of diatoms. *Braz. J. Biol.*, 70(3), 493-502.
- Berthon, V., Bouchez, A., & Rimet, F. (2011). Using diatom life-forms and ecological guilds to assess organic pollution and trophic level in rivers: a case study of rivers in south-eastern France. *Hydrobiologia*, 673, 259-271.
- Biggs, B. J. (1990). periphyton communities and their environments in New Zealand rivers. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater research*, 24, 367-386.
- Biggs, B. J. (1996). Patterns in benthic algae of streams. En R. J. Stevenson, M. L. Bothwell, & R. L. Lowe, *Algal ecology: Freshwater benthic ecosystems* (págs. 31–51). San Diego, California: Academic Press.
- Biggs, B. J., & Smith, R. A. (2002). Taxonomic richness of stream benthic algae: Effects of flood disturbance and nutrients. *Limnol. Oceanogr.*, 47(4), 1175–1186.
- Biggs, B. J., Nikora, V. I., & Snelder, T. H. (2005). Linking scales of flow variability to lotic ecosystem structure and function. *River Research and Applications*, 21, 283–298.
- Biggs, B. J., Stevenson, R. J., & Lowe, R. L. (1998). A habitat matrix conceptual model for stream periphyton. *Archiv fur Hydrobiologie*, 143(1), 21-56.
- Burt, C., Bachoon, D. S., Manoylov, K., & Smith, M. (2013). The impact of cattle farming best management practices on surface water nutrient concentrations, faecal bacteria and algal dominance in the Lake Oconee watershed. *Water and Environment Journal*, 27, 207–215.
- Collins, S. L., Glenn, S. M., & Gibson, D. J. (1995). Experimental analysis of intermediate disturbance and initial floristic composition: decoupling cause and effect. *Ecology*, 76, 486–492.

- Connell, J. H. (1978). Diversity in tropical rain forests and coral reefs. *Science*, 199, 1302–1310.
- Consalvey, M., Paterson, D. M., & Underwood, G. J. (2004). The ups and downs of life in a benthic biofilm: migration of benthic diatoms. *Diatom Res*, 19, 181-202.
- Cooper, S. D. (1998). Implications of scale for patterns and processes in stream ecology. *Australian Journal of Ecology*, 23, 27–40.
- Corpoboyacá. (octubre de 2013). *Corpoboyacá*. Obtenido de <http://www.corpoboyaca.gov.co/index.php/es/nuestra-gestion/plan-de-ordenacion-y-manejo-de-cuencas/item/304-pomca-cusiana>
- Correa, H. D., Ruiz, S. L., & Arevalo, L. M. (2005). *Plan de accion en biodiversidad de la cuenca del Orinoco – Colombia / 2005 - 2015 - Propuesta Tecnica..*. Bogota D.C, Colombia: Corporinoquia, Cormacarena, I.A.v.H, Unitropico, Fundacion Omacha, Fundacion Horizonte Verde, Universidad Javeriana, Unillanos, WWF. 273 pp.
- Cummins, K., Wilzbach, M., Gates, D., Perry, J., & Taliaferro, B. (1989). Shredders and riparian vegetation. *Bioscience*, 39, 24-30.
- Díaz-Quiros, C., & Rivera-Rondón, C. (2004). Diatomeas de pequeños ríos andinos y su utilización como indicadores de condiciones ambientales. *Caldasia*, 26(2), 381-394.
- Dodds, W. K., & Biggs, B. J. (2002). Water velocity attenuation by stream periphyton and macrophytes in relation to growth form and architecture. *J N Am Bentholl Soc*, 21, 2–15.
- Dudgeon, D. e. (2008). *Tropical stream ecology*. London: Academic Press (Aquatic Ecology Series).
- Elosegi, A., & Sabater, S. (2009). *Conceptos y Técnicas en Ecología Fluvial*. (F. BBVA, Ed.) España: Rubes Editorial.
- Finkel, Z. V., Vaillancourt, C. J., Irwin, A. J., Reavie, E. D., & Smol, J. P. (2009). Environmental control of diatom community size structure varies across aquatic ecosystems. *Proc. R. Soc. B*, 276, 1627–1634.
- Furey, P. (2010). *Eunotia*. Recuperado el 12 de abril de 2016, de Diatoms of the United States: <http://westerndiatoms.colorado.edu/taxa/genus/eunotia>
- Gobran, G. R., & Clegg, S. (1992). Relationship between total dissolved organic carbon and SO₄⁻² in soil and waters. *Science of The Total Environment*, 117–118, 449-461.

- Gordon, N. D., McMahon, T. A., & Finlayson, B. L. (1992). *Stream Hydrology: An Introduction for Ecologists*. Chichester, UK: John Wiley and Sons.
- Hamilton, P. (2010). *Brachysira brebissonii*. Recuperado el 02 de Abril de 2016, de Diatoms of the United States: http://westerndiatoms.colorado.edu/taxa/species/brachysira_brebissonii
- Hammer, O., Harper, D., & Ryan, P. (2001). PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Palaeontologia Electronica*, 4, 1-9.
- Hering, D., Johnson, R., Kramm, S., Schmutz, S., Szoskiewich, K., & Verdonschot, P. (2006). Assessment of European streams with diatoms, macrophytes, macroinvertebrates and fish: a comparative metric-based analysis of organism response to stress. *Freshwater Biology*, 51, 1757–1785.
- Hermany, G., Schwarzbald, A., Lobo, E. A., & Oliveira, M. A. (2006). Ecology of the epilithic diatom community in a low-order stream system of the Guaíba hydrographical region: subsidies to the environmental monitoring of southern Brazilian aquatic systems. *Acta Limnologica Brasiliensia*, 18, 9–27.
- Hill, W. R. (1996). Effects of light. En Stevenson, *Algal Ecology*: (págs. 121-148). San Diego: Academic Press Inc.
- Horner, R. R., & Welch, E. B. (1981). Stream Periphyton Development in Relation to Current Velocity and Nutrients. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 38, 449-457.
- Iserentant, R., Ector, L., Straub, F., & Hernández-Becerril, D. (1999). Méthodes et techniques de préparation des échantillons de diatomées. *Cryptogamie Algology*, 20, 143–148.
- Junk, W. J. (1999). The flood pulse concept of large rivers: learning from the tropics. *Archiv für Hydrobiologie*, 115(suppl), 261-280.
- Jüttner, I., Rothfritz, H., & Ormerod, S. J. (1996). Diatoms as indicators of river quality in the Nepalese Middle Hills with consideration of the effects of habitat-specific sampling. *Freshwater Biology*, 36, 475-486.
- Karthick, B., Taylor, J. C., Mahesh, M. K., & Ramachandra, T. V. (2010). Protocols for Collection, Preservation and Enumeration of Diatoms from Aquatic Habitats for Water Quality Monitoring in India. *The IUP Journal of Soil and Water Sciences*, III(1).

- Krammer, K., & Lange-Bertalot, H. (1986). Bacillariophyceae. 1. Teil: Naviculaceae. En H. Ettl, J. Gerloff, H. Heynig, & D. Mollenhauer, *Süßwasser flora von Mitteleuropa, Band 2/1* (pág. 876). New York: Gustav Fischer Verlag.
- Krammer, K., & Lange-Bertalot, H. (1991). Bacillariophyceae. 3. Teil: Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae. En H. Ettl, J. Gerloff, H. Heynig, & D. Mollenhauer, *Süßwasserflora von Mitteleuropa, Band 2/3*. (pág. 576). Jena: Gustav Fischer Verlag, Stuttgart.
- Lake, P. S. (2000). Disturbance, patchiness, and diversity in streams. *J. N. Am. Benthol. Soc.*, 19(4), 573–592.
- Lange, K., Liess, A., Piggott, J. J., Townsend, T. R., & Matthaei, C. D. (2011). Light, nutrients and grazing interact to determine stream diatom community composition and functional group structure. *Freshwater Biology*, 56, 264–278.
- Lange-Bertalot, H. (1993). 85 new taxa and much more than 100 taxonomic clarifications supplementary. En J. Cramer, *Süßwasserflora von Mitteleuropa Vol. 2*. Berlins Stuttgart.
- Lange-Bertalot, H. (1995). *Iconographia diatomologica, annotated diatoms micrographs. Phytogeographtdiversity-Taxonomy* (Vol. 6). ARG: Gantner Verlag K.G.
- Lange-Bertalot, H. (1995). *Iconographia diatomologica, annotated diatoms micrographs. Vol. 1. Taxonomy*. Koeltz Scientific Books.
- Lange-Bertalot, H. (1998). *Iconographia diatomologica, annotated diatoms micrographs. Diversity-Taxonomy-Geobotany* (Vol. 5). Koeltz Scientific Books.
- Lange-Bertalot, H. (2000). *Iconographia diatomologica. Diatoms of the Andes* (Vol. 9). (A. G. K.G., Ed.) Koeltz Scientific Books.
- Lange-Bertalot, H. (2007.). *Iconographia diatomologica. Tropical diatoms of South America II*. (Vol. 18). (A. G. K.G., Ed.) Koeltz Scientific Books.
- Ledesma, J. L., Futter, M., Laudon, H., Evans, C. D., & Köhler, S. (2016). Boreal forest riparian zones regulate stream sulfate and dissolved organic carbon. *Science of the total environment*, 560-561, 110-122.
- Leinberger, E. (2010). Stream and Riparian Ecology. En J. S. Richardson, & R. Moore, *Compendium of Forest Hydrology and Geomorphology in British Columbia* (pág. 443). B.C. Min. For.Range, For. Sci. Prog., Victoria, B.C.

- Leira, M., Chen, G., Dalton, C., Irvine, K. N., & Taylor, D. H. (2009). Patterns in freshwater diatom taxonomic distinctness along an eutrophication gradient. *Freshwater Biology*(54), 1- 14.
- Licursi, M., & Gómez, N. (2002). Benthic diatoms and some environmental conditions in three lowland streams. *Ann. Limnol.*, 38(2), 109-118.
- Licursi, M., & Gómez, N. (2009). Effects of dredging on benthic diatom assemblages in a lowland stream. *Journal of Environmental Management*, 90, 973–982.
- Litchman, E., & Klausmeier, C. A. (2008). Trait-based community ecology of phytoplankton. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.*, 39, 615–639.
- Lobo, E. A., & Carvalho, T. L. (1988). Análise da estrutura da comunidade de diatomáceas (Bacillariophyceae) em duas estações do sistema Guaíba, Rio Grande do Sul, Brasil. *Acta bot. bras.*, 1(2), 103-119.
- Magurran, A. E. (2004). *Measuring biological diversity*. Oxford: Blackwell Science.
- Malagón, C. D. (2003). Ensayo sobre tipología de suelos colombianos - Énfasis en génesis y aspectos ambientales. *Rev. Acad. Colomb. Cienc*, 27(104), 319-341.
- Margalef, R. (1983). *Limnología*. Barcelona: Ediciones Omega, S.A.
- Martínez, L., & Donato, J. (2003). Efectos del caudal sobre la colonización de algas en un río de alta montaña tropical (Boyacá, Colombia). *Caldasia*, 25(2), 337-354.
- Medina M., L. M. (2013). Aspectos limnológicos del morichal y la quebrada La Vieja, piedemonte andino orinoquense colombiano. En C. A.-B. Lasso, *VII. Morichales y canangunchales de la Orinoquia y Amazonia: Colombia - Venezuela. Parte I. Serie Editorial Recursos Hidrobiológicos y Pesqueros Continentales de Colombia* (págs. cap. 113, 195-214). Bogotá D.C.: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Michels, A., Umaña, G., & Raede, U. (2006). Epilithic diatom assemblages in rivers draining into Golfo Dulce (Costa Rica) and their relationship to water chemistry, habitat characteristics and land use. *Archiv für ydrobiologie*, 165, 167-190.
- Molloy, J. M. (1992). Diatom communities along stream longitudinal gradients. *Freshwater Biology*, 28, 59–69.
- Mora, A., Sánchez, L., Lasso, C., & Mac-Quhae, C. (2007). Parámetros fisicoquímicos de algunos cuerpos de agua adyacentes a la confluencia de los ríos Orinoco y Ventuari, estado Amazonas, Venezuela. *Boletín del Centro de Investigaciones Biológicas*, 41(1), 44–50.

- Pan, Y., Stevenson, R. J., Hill, B. H., Herlihy, A. T., & Collins, G. B. (1996). Using diatoms as indicators of ecological conditions in lotic systems a regional assessment. *Journal of the North American Benthological Society*, 15(4), 481-495.
- Passy, S. I. (2001). Spatial paradigms of lotic diatom distribution: a landscape ecology perspective. *J. Phycol.*, 37, 370–378.
- Passy, S. I. (2007a). Diatom ecological guilds display distinct and predictable behavior along nutrient and disturbance gradients in running waters. *Aquatic Botany*, 86, 171-178.
- Passy, S. I. (2007b). Differential cell size optimization strategies produce distinct diatom richness–body size relationships in stream benthos and plankton. *Journal of Ecology*, 95, 745-754.
- Passy, S. I. (2008). Continental diatom biodiversity in stream benthos declines as more nutrients become limiting. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105, 9663–9667.
- Passy, S. I., & Blanchet, F. G. (2007). Algal communities in human-impacted stream ecosystems suffer beta-diversity decline. *Diversity and distributions*, 13(6), 670-679.
- Pedraza, E., & Donato, J. (2011). Diversidad y distribución de diatomeas en un arroyo de montaña de los andes Colombianos. *Caldasia*, 33(1), 177-191.
- Peterson, C. G., & Stevenson, J. R. (1989). Substratum conditioning and diatom colonization in different current regimes. *J. Phycol.*, 25, 790–793.
- Ponader, K. C., & Potapova, M. G. (2007). Diatoms from the genus *Achnantheidium* in flowing waters of the Appalachian Mountains (North America): Ecology, distribution and taxonomic notes. *Limnologica*, 37, 227- 241.
- Potapova, M. G. (2002). Benthic diatoms in USA rivers: distributions along spatial and environmental gradients. *Journal of Biogeography*, 29(2), 167-187.
- Potatova, M. G., & Charles, D. F. (2003). Distribution of benthic diatoms in U.S. rivers in relation to conductivity and ionic composition. *Freshwater Biology*, 48, 1311-1328.
- Pringle, C. M. (1990). Nutrient Spatial Heterogeneity: Effects on Community Structure, Physiognomy, and Diversity of Stream Algae. *Ecology*, 71(3), 905-920.
- Prygiel, J., & Coste, M. (2000). *Guide méthodologique pour la mise en œuvre de l'Indice Biologique Diatomées*. NF T 90-354.: Étude Agences de l'Eau - Cemagref Bordeaux.

- Ramírez, A., & Plata-Díaz, Y. (2008). Diatomeas perifíticas en dos tramos de dos sistemas lóticos de alta montaña (Páramo de Santurbán, Norte de Santander, Colombia) y su relación con las variables ambientales. *Acta biol. Colomb.*, 13(1), 199-216.
- Rimet, F., & Bouchez, A. (2011). Use of diatom life-forms and ecological guilds to assess pesticide contamination in rivers: Lotic mesocosm approaches. *Ecological Indicators*, 11, 489–499.
- Rimet, F., & Bouchez, A. (2012). Life-forms, cell-sizes and ecological guilds of diatoms in European rivers. *Knowl. Managt. Aquatic Ecosyst.*, 406, 1-12.
- Rippstein, G., Escobar, G., & Motta, F. (2001). *Agroecología y biodiversidad de las Sabanas en los Llanos Orientales de Colombia*. Cali, Colombia: Centro Internacional de Agricultura Tropical.
- Rivera, C. A., Zapata, A. M., Perez, D., Morales, Y., Ovalle, H., & Alvarez, J. P. (2010). Caracterización limnológica de humedales de la planicie de inundación del Río Orinoco (Orinoquía, Colombia). *Acta biol. Colomb.*, 15(1), 145 - 166.
- Rivera, C., & Donato, J. (2008). Influencia de las Variaciones Hidrológicas y Químicas Sobre la Diversidad de Diatomeas Bénticas. En J. Donato, *Ecología de un río de montaña de los Andes Colombianos (río Tota, Boyacá)* (págs. 82-102). Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias.
- Roldán, P., & Ramírez, J. (2008). *Fundamentos de Limnología neotropical*. Medellín: Universidad de Antioquia.
- Round, F. E., Crawford, R. M., & Mann, D. G. (1990). *The diatoms. Biology, morphology of the genera*. Cambridge University press.
- Sala, S. E., Ramirez, J. J., Vouilloud, A. A., & Plata-Díaz, Y. (2013). *Surirella antioquiensis* sp. nov. and *S. rafaellii* sp. nov. (Bacillariophyta) from Colombia. *RevActaNova*, 6(1-2), 17-35.
- Sala, S., Lamaro, A., Duque, S., & Núñez-Avellaneda, M. (2002). Diatoms from the Colombian Amazon: some species of the genus *Eunotia* (Bacillariophyceae). *Acta Amazonica*, 32(4), 589-603.
- Sánchez, E. J. (2010). Los suelos de Colombia. En O. Burbano, & M. (. Silva, *Ciencias del suelo principios básicos* (págs. 487–552). Bogotá, Colombia: Sociedad colombiana de la ciencia del suelo.

- Schneck, F., & Melo, A. S. (2012). Hydrological disturbance overrides the effect of substratum roughness on the resistance and resilience of stream benthic algae. *Freshwater Biology*, 57(8), 1678-1688.
- Schneck, F., Lange, K., Melo, A. S., Townsend, C. R., & Matthaei, C. D. (2017). Effects of a natural flood disturbance on species richness and beta diversity of stream benthic diatom communities. *Aquatic Ecology*, 51(4), 557-569.
- Spaulding, S., & Edlund, M. B. (2008). *Nupela*. Recuperado el 06 de Abril de 2016, de Diatoms of the United States: <http://westerndiatoms.colorado.edu/taxa/genus/Nupela>
- Srivastava, J. K., Chandra, H., Kalra, S. J., Mishra, P., Khan, H., & Yadav, P. (2016). Plant–microbe interaction in aquatic system and their role in the management of water quality: a review. *Applied Water Science*, 1-12.
- Steinberg, C. E. (2003). *Ecology of humic substances in freshwaters*. Berlin, Germany: Springer.
- Steinman, A. D. (1996). Effects of grazers on freshwater benthic algae. En R. J. Stevenson, M. L. Bothwell, & R. L. Lowe, *Algal ecology: freshwater benthic ecosystems* (págs. 341-373). San Diego, USA: Academic Press, Inc.
- Stenger-Kovács, C., Lengyel, E., Crossetti, L. O., Üveges, V., & Padisák, J. (2013). Diatom ecological guilds as indicators of temporally changing stressors and disturbances in the small Torna-stream, Hungary. *Ecological Indicators*, 24, 138–147.
- Stenger-Kovacs, C., Toth, L., Toth, F., Hajnal, E., & Padisak, J. (2014). Stream order dependent diversity metrics of epilithic diatom assemblages. *Hydrobiologia*, 721, 67–75.
- Stevenson, R. J. (1996). An introduction to algal ecology in freshwater benthic habitats. En R. Stevenson, M. Bothwell, & R. Lowe, *Freshwater benthic ecosystems* (págs. 3-30). London: Academic Press Limited.
- Stevenson, R. J., & Pan, Y. (1999). Assessing environmental conditions in rivers and streams with diatoms. En E. Stoermer, & J. Smol, *The Diatoms: Applications for the Environmental and Earth Sciences* (págs. 11-40). New York: Cambridge University Press.
- Stevenson, R. J., Bothwell, M. L., & Lowe, R. L. (1996). *Algal ecology: Freshwater Benthic Ecosystems*. London: Academic Press Limited.

- Stevenson, R. J., Rier, S. T., Riseng, C. M., Schultz, R. E., & Wiley, M. J. (2006). Comparing effects of nutrients on algal biomass in streams in 2 regions with different disturbance regimes and with applications for developing nutrient criteria. *Hydrobiologia*, *561*, 149–165.
- Stokes, P. M. (1986). Ecological Effects of Acidification on Primary Producers in Aquatic Systems. En H. C. Martin, *Acidic Precipitation*. Dordrecht: Springer.
- Sun, J., & Liu, D. (2003). Geometric models for calculating cell biovolume and surface area for phytoplankton. *J. Plankton Res*, *25*, 1331-1346.
- Tang, T., Quian Niu, S., & Dudgeon, D. (2013). Responses of epibenthic algal assemblages to water abstraction in Hong Kong streams. *Hydrobiologia*, *703*, 225–237.
- ter Braak, C. J., & Smilauer, P. (1998). CANOCO reference manual and user's guide to Canoco for Windows – software for canonica community ordination (version 4). Microcomputer Power.
- Tison, J., Park, Y. S., Coste, M., Wasson, J. G., Ector, L., Rimet, F., & Delmas, F. (2005). Typology of diatom communities and the influence of hydroecoregions: A study on the French hydrosystem scale. *Water Res*, *39(14)*, 3177-3188.
- Urbano-Bonilla, A., Prada-Pedrerros, S., Zapata, A., & Barrera-Cataño, J. (2014). Composición y riqueza íctica en quebradas y ríos del piedemonte de la cuenca del río Cusiana, Orinoquia colombiana. *Biota Colombiana*, *15(1)*, 52-69.
- Vannote, R. L., Wayne, M. K., Cummins, J. R., & Cobert, E. C. (1980). "The River Continuum Concept". *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, *37*, 130-137.
- Veraart, A. J., Romani, A. M., Tornés, E., & Sabater, S. (2008). Algal response to nutrient enrichment in forested oligotrophic stream. *Journal of Phycology*, *44*, 564–572.
- Wang, Q., Zhi, C., Hamilton, P. B., & Kang, F. (2009). Diatom distributions and species optima for phosphorus and current velocity in rivers from ZhuJiang Watershed within a Karst region of South-Central China. *Archiv für Hydrobiologie*, *175(2)*, 125-141.
- Ward, J. V. (1989). The four-dimensional nature of lotic ecosystems. *J. N. Am. Benthol. Soc*, *8*, 2-8.
- Wehr, J. D., & Descy, J. P. (1998). Use of phytoplankton in large river management. *Journal of Phycology*, *34*, 741–749.
- Wetzel, R. (1983). *Periphyton of aquatic ecosystem*. The Hague, Holanda: B.V. Junk.

- Wunsam, S., Cattaneo, A., & Bourassa, N. (2002). Comparing diatom species, genera and size in biomonitoring: a case study from streams in the Laurentians (Quebec, Canada). *Freshwater Biology*, 47, 325–340.
- Yang, G. Y., Tang, T., & Dudgeon, D. (2009). Spatial and seasonal variations in benthic algal assemblages in streams in monsoonal Hong Kong. *Hydrobiologia*, 632, 189–200.
- Zapata, A., & Donato, J. (2005). Cambios diarios de las algas perifíticas y su relación con la velocidad de la corriente en un río tropical de montaña (río Tota-Colombia). *Limnética*, 24(3-4), 327-338.

13. ANEXOS

Anexo A. Rótulos de cada punto de muestreo. Organizado con las iniciales del nombre de cada corriente, el mes de muestreo: septiembre lluvias y febrero sequía y punto por tramo: Arriba y abajo de la alteración antrópica

| Corriente | Mes | Tramo | Rótulo |
|-------------------------------|------------|--------|--------|
| Quebrada Aguablanca | Septiembre | Arriba | Agusar |
| | | Abajo | Agusab |
| | Febrero | Arriba | Agufar |
| | | Abajo | Agufab |
| Quebrada Iglesias | Septiembre | Arriba | Iglsar |
| | | Abajo | Iglsab |
| | Febrero | Arriba | Iglfar |
| | | Abajo | Iglfab |
| Quebrada Resbalosa | Septiembre | Arriba | Ressar |
| | | Abajo | Ressab |
| | Febrero | Arriba | Resfar |
| | | Abajo | Resfab |
| Quebrada Tauramenera | Septiembre | Arriba | Tausar |
| | | Abajo | Tausab |
| | Febrero | Arriba | Taufar |
| | | Abajo | Taufab |
| Quebrada Mata de los Cajuches | Septiembre | Arriba | Matsar |
| | | Abajo | Matsab |
| | Febrero | Arriba | Matfar |
| | | Abajo | Matfab |
| Quebrada Limonera | Septiembre | Arriba | Limsar |
| | | Abajo | Limsab |
| | Febrero | Arriba | Limfar |
| | | Abajo | Limfab |
| Río Caja | Arriba | Arriba | Cajsar |
| | | Abajo | Cajsab |
| | Abajo | Arriba | Cajfar |
| | | Abajo | Cajfab |
| Río Cusiana | Septiembre | Arriba | Cussar |
| | | Abajo | Cussab |
| | Febrero | Arriba | Cusfar |
| | | Abajo | Cusfab |
| Río Chitamena | Septiembre | Arriba | Chisar |
| | | Abajo | Chisab |
| | Febrero | Arriba | Chifar |
| | | Abajo | Chifab |

Anexo B. Valores de las variables fisicoquímicas medidas durante los dos períodos de muestreo.

| Rótulo | Alcalinidad Total (mg/L CaCO3) | Calcio (mg/L Ca) | Carbono Inorgánico Total (mg/L) | Carbono Orgánico Total (mg/L) | Cloruros (mg/L Cl-) | Coliformes Fecales (NMP/100ml) | Coliformes Totales (NMP/100ml) | Color UPC | D.B.O. (mg/L O2) | D.Q.O. (mg/L O2) | Dureza total (mg/L CaCO3) | Fósforo Soluble (mg/L P) | Fósforo Total (mg/L P) | Hierro Total (mg/L Fe) | Magnesio (mg/L Mg) | Manganeso (mg/L Mn) | Nitratos (mg/L N) | Nitritos (mg/L N) | Nitrógeno Amoniacal (mg/L N) | Nitrógeno Total Kjeldahl (mg/L N) | Potasio (mg/L K) | Silice (mg/L SiO2) | Sodio (mg/L Na) | Sólidos Disueltos Totales (mg/L) | Sólidos suspendidos Totales (mg/L) | Sólidos Totales (mg/L) | Sulfatos (mg/L SO4) | Materia orgánica | Turbidez UNT | Velocidad de corriente | |
|---------|--------------------------------|------------------|---------------------------------|-------------------------------|---------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------|------------------|------------------|---------------------------|--------------------------|------------------------|------------------------|--------------------|---------------------|-------------------|-------------------|------------------------------|-----------------------------------|------------------|--------------------|-----------------|----------------------------------|------------------------------------|------------------------|---------------------|------------------|--------------|------------------------|------|
| Matsar | 3 | <1,6 | 0,3 | 0,77 | <2 | <1 | 119,6 | <5 | 2 | 8 | <4 | 0,06 | 0,06 | 0,15 | <0,10 | <0,03 | 0,05 | 0,005 | 0,03 | <0,54 | <0,10 | 1,71 | 0,63 | <35 | <5 | <35 | 5,7 | 0,84 | 0,40 | 0,27 | |
| Matsab | 3 | <1,6 | 0,3 | 0,77 | <2,0 | <1 | 149,4 | <5 | 2 | 8 | 5 | 0,03 | 0,07 | 0,15 | <0,10 | <0,03 | 0,04 | 0,005 | 0,03 | <0,54 | <0,10 | 3,05 | 0,67 | <35 | <5 | <35 | 5,4 | 0,05 | 0,70 | 0,30 | |
| Limsar | <3 | <4 | 0,46 | 0,92 | <2 | <1 | 593,8 | <5 | <2 | 8 | 5 | 0,1 | 0,06 | 0,27 | <0,10 | <0,03 | 0,05 | 0,005 | 0,01 | <0,54 | 0,95 | 7,13 | 0,85 | <35 | <5 | <35 | 3,1 | 2,31 | 6,00 | 0,31 | |
| Limsab | <3 | <4 | 0,61 | 1,07 | <2 | <1 | 1299,7 | 10 | 2 | 10 | <4 | 0,02 | 0,09 | 0,28 | <0,10 | <0,03 | 0,02 | 0,004 | 0,03 | <0,54 | <0,10 | 6,11 | 0,76 | <35 | 24 | <35 | 3,4 | 1,01 | 40,00 | 0,21 | |
| Tausar | 4 | <1,6 | 0,46 | 0,77 | <2 | <1 | 601,5 | <5 | <2 | 11 | <4 | 0,03 | 0,1 | 0,24 | <0,10 | <0,03 | 0,05 | 0,005 | 0,01 | <0,54 | 0,52 | 3,56 | 0,77 | <35 | <5 | <35 | 3,4 | 0,06 | 0,70 | 0,29 | |
| Tausab | 3 | <4 | 0,3 | 0,77 | <2 | <1 | 1413,6 | <5 | <2 | 13 | <4 | 0,02 | 0,06 | 0,25 | <0,10 | <0,03 | 0,05 | 0,005 | 0,02 | <0,54 | 1,01 | 3,28 | 0,77 | <35 | <5 | <35 | 3,6 | 0,15 | 0,90 | 0,22 | |
| Agusar | <3 | <1,6 | 0,61 | 0,92 | <2 | <1 | 499,6 | <5 | 2 | 6 | <4 | 0,01 | 0,05 | 0,25 | <0,10 | <0,03 | 0,05 | 0,005 | 0,01 | <0,54 | <0,10 | 2,59 | 0,66 | <35 | <5 | <35 | 3,4 | 0,03 | 0,60 | 0,29 | |
| Agusab | <3 | <1,6 | 0,46 | 0,77 | <2 | <1 | 3998 | <5 | 2 | 9 | <4 | 0,08 | 0,08 | 0,21 | <0,10 | <0,03 | 0,06 | 0,005 | 0,02 | <0,54 | <0,10 | 4,49 | 0,67 | <35 | <5 | <35 | 3,1 | 0,01 | 0,60 | 0,38 | |
| Ressar | 3 | <1,6 | 0,46 | 0,77 | <2 | <1 | 1500 | <5 | <2 | 12 | <4 | 0,01 | 0,03 | 0,28 | <0,10 | <0,03 | 0,05 | 0,005 | 0,01 | <0,54 | 0,75 | 3,98 | 0,75 | <35 | <5 | <35 | 3,5 | 0,07 | 1,00 | 0,03 | |
| Ressab | <3 | <1,6 | 0,46 | 0,77 | <2 | 97 | 2300 | <5 | <2 | 8 | <4 | 0,01 | 0,04 | 0,22 | <0,10 | <0,03 | 0,05 | 0,005 | 0,03 | <0,54 | 0,66 | 2,68 | 0,77 | <35 | <5 | <35 | 3,8 | 0,02 | 0,90 | 0,22 | |
| Igisar | 5 | <1,6 | 0,3 | 0,61 | <2 | <1 | 298,7 | <5 | <2 | <6 | <4 | 0,02 | 0,08 | 1,17 | 0,11 | <0,03 | 0,12 | 0,005 | 0,03 | <0,54 | 0,34 | 4,39 | 1,04 | <35 | <5 | <35 | 3,8 | 0,18 | 4,00 | 0,44 | |
| Igisab | 3 | <1,6 | 0,61 | 0,92 | <2 | <1 | 2400 | <5 | <2 | <6 | 4 | 0,02 | 0,06 | 0,23 | 0,11 | <0,03 | 0,06 | 0,005 | 0,02 | <0,54 | 1,34 | 5,46 | 1,04 | <35 | <5 | <35 | 3,4 | | 4,50 | | |
| Cajsar | 11 | 4 | 0,91 | 1,53 | <2 | <1 | 10500 | 18 | 2 | 9 | 13 | 0,04 | 0,08 | 0,47 | 4,3 | 0,09 | 0,05 | 0,005 | 0,04 | <0,54 | 1,17 | 6,2 | 10,3 | <35 | 13 | <35 | 3,8 | 0,25 | 21,00 | 0,68 | |
| Cajsab | 13 | 4 | 0,76 | 1,22 | <2 | <1 | 29810 | 10 | 2 | 11 | 14 | 0,08 | 0,06 | 0,5 | 0,87 | 0,04 | 0,06 | 0,06 | 0,03 | <0,54 | <0,10 | 5,27 | 2,28 | <35 | <5 | <35 | 3,8 | 0,00 | 7,00 | 0,75 | |
| Cussar | 20,5 | 10 | 3,8 | 4,59 | 4,5 | 200 | 10000 | 125 | <2 | 13 | 33 | 0,06 | 0,14 | 1,16 | 1,79 | 0,05 | 0,05 | 0,005 | 0,02 | <0,54 | <0,10 | 1,43 | 4,9 | 53 | 18 | 71 | 24,8 | 0,00 | 30,00 | 0,52 | |
| Cussab | 14 | 4,8 | 6,07 | 7,04 | <2 | 4960 | 23000 | 200 | 2 | 21 | 20 | 0,08 | 0,12 | 1,68 | 5,1 | 0,19 | 0,02 | 0,004 | 0 | <0,54 | 1,16 | 1,89 | 8,5 | <35 | 54 | 84 | 10,2 | 0,02 | 90,00 | 0,43 | |
| Chisar | 6 | 1,6 | 1,06 | 1,84 | <2 | 300 | 7990 | 10 | <2 | 20 | 5 | 0,01 | 0,12 | 0,63 | 0,34 | <0,03 | 0,07 | 0,005 | 0,02 | <0,54 | 1,13 | 5,04 | 1,28 | <35 | 12 | <35 | 7 | 2,36 | 20,00 | 0,53 | |
| Chisab | 8 | <4 | 0,76 | 1,38 | <2 | <1 | 3000 | 11 | <2 | 14 | 6 | 0,02 | 0,06 | 0,42 | 0,29 | <0,03 | 0,07 | 0,005 | 0,03 | <0,54 | 0,16 | 5,6 | 1,3 | <35 | 9 | <35 | 15 | 0,00 | 15,00 | 0,39 | |
| Mattfar | <3 | <1,6 | 1,22 | 0,77 | <2 | 100 | 15940 | 5 | <2 | 9 | <4 | 0,02 | 0,05 | 0,34 | <0,10 | <0,03 | -0,04 | 0,004 | 0,01 | <0,54 | 0,9 | 6,29 | 1,9 | <35 | <5 | <35 | 3,6 | 1,04 | 3,00 | 0,18 | |
| Mattfab | <3 | <1,6 | 1,22 | 0,77 | <2 | 200 | 19890 | 6 | <2 | 10 | <4 | 0,02 | 0,05 | 0,11 | <0,10 | <0,03 | -0,03 | 0,005 | 0,02 | <0,54 | 0,15 | 5,69 | 0,75 | <35 | <5 | <35 | 3,6 | 0,15 | 1,00 | 0,09 | |
| Limfar | <3 | <1,6 | 1,22 | 0,77 | <2 | <1 | 298,7 | <5 | <2 | 8 | <4 | 0,07 | 0,08 | 0,11 | <0,10 | <0,03 | -0,05 | 0,035 | 0,03 | <0,54 | 1,86 | 9,21 | 0,78 | <35 | <5 | <35 | 4,1 | 1,92 | 1,50 | 0,22 | |
| Limfab | <3 | <1,6 | 1,38 | 0,77 | <2 | <1 | <1 | <5 | <2 | 8 | <4 | 0,04 | 0,07 | <0,10 | <0,10 | <0,03 | -0,03 | 0,005 | 0,18 | 0,23 | 0,2 | 10,09 | 1,11 | <35 | <5 | <35 | 3,9 | 1,03 | 1,00 | 0,47 | |
| Taufar | <3 | <1,6 | 1,38 | 0,77 | <2 | <1 | 199,7 | 7 | <2 | 8 | <4 | 0,04 | 0,08 | 0,14 | <0,10 | <0,03 | 0,03 | 0,005 | 0,03 | <0,54 | 1,58 | 8,56 | 0,58 | <35 | <5 | <35 | 4,3 | 0,13 | 0,90 | 0,43 | |
| Taufab | <3 | <1,6 | 1,22 | 0,77 | <2 | 100 | 399,8 | 5 | <2 | 10 | <4 | 0,06 | 0,08 | 0,11 | <0,10 | <0,03 | -0,02 | 0,006 | 0,04 | <0,54 | 0,16 | 8,47 | 0,73 | <35 | <5 | <35 | 3 | 0,27 | 0,80 | 0,13 | |
| Agufar | <3 | <1,6 | 0,92 | 0,77 | <2 | <1 | 10000 | <5 | <2 | 8 | <4 | 0 | 0,04 | 0,21 | <0,10 | <0,03 | -0,08 | 0,004 | 0,03 | <0,54 | 0,24 | 5,6 | 0,8 | <35 | <5 | <35 | 4,4 | 0,07 | 1,00 | 0,14 | |
| Agufab | <3 | <1,6 | 1,07 | 0,77 | <2 | <1 | 5980 | <5 | <2 | 11 | <4 | 0,02 | 0,05 | 0,14 | <0,10 | <0,03 | -0,08 | 0,005 | 0,01 | <0,54 | 0,18 | 6,99 | 0,77 | <35 | <5 | <35 | 4,3 | 0,03 | 0,90 | 0,21 | |
| Resfar | <3 | <1,6 | 0,92 | 1,53 | <2 | <1 | 15030 | 44 | <2 | 10 | <4 | 0,01 | 0,03 | 1,57 | 0,12 | 0,12 | -0,04 | 0,006 | 0,01 | <0,54 | 0,18 | <0,1 | 1,34 | <35 | 8 | <35 | 3,6 | 0,03 | 2,00 | 0,06 | |
| Resfab | 3 | <1,6 | 1,22 | 0,77 | <2 | <1 | 12960 | 7 | <2 | 9 | <4 | 0,02 | 0,04 | 0,22 | <0,10 | <0,03 | -0,02 | 0,005 | 0,04 | <0,54 | 0,15 | 8,79 | 0,75 | <35 | <5 | <35 | 3,6 | 0,04 | 0,60 | 0,24 | |
| Igifar | <3 | <1,6 | 1,22 | 0,61 | <2 | 197,6 | 1732,9 | <5 | <2 | 8 | <4 | 0,03 | 0,07 | <0,10 | 0,13 | <0,03 | 0,01 | 0,055 | 0,03 | <0,54 | 0,2 | 9,3 | 0,95 | <35 | <5 | <35 | 3,6 | 0,80 | 0,60 | 0,20 | |
| Igifab | <3 | <1,6 | 1,38 | 0,61 | <2 | 497 | 14136 | <5 | <2 | 9 | 4 | 0,01 | 0,03 | <0,10 | 0,13 | <0,03 | -0,03 | 0,006 | 0,04 | <0,54 | 0,14 | <0,1 | 0,75 | <35 | <5 | <35 | 3,8 | 0,17 | 0,60 | 0,36 | |
| Cajfar | 16 | 6,4 | 0,77 | 1,22 | <2 | <1 | 24950 | <5 | <2 | 10 | 22 | 0,03 | 0,06 | 0,17 | 1,05 | <0,03 | -0,04 | 0,004 | 0,04 | <0,54 | 0,29 | 6,29 | 1,95 | <35 | <5 | <35 | 3,6 | 4,1 | 0,01 | 1,50 | 0,38 |
| Cajfab | 20 | 7,2 | 1,53 | 0,92 | <2 | 410 | 32550 | 7 | <2 | 9 | 28 | 0,07 | 0,1 | 0,32 | 1,06 | 0,05 | -0,06 | 0,052 | 0,1 | 0,13 | 0,4 | 6,66 | 2,59 | 38 | 10 | 50 | 4,1 | 95,09 | 2,50 | 0,36 | |
| Cusfar | 26 | 13,6 | 1,84 | 0,92 | 10,5 | 620 | 700000 | 24 | <2 | 12 | 44 | 0,02 | 0,05 | 0,74 | 2,2 | 0,11 | -0,03 | 0,005 | 0,04 | <0,54 | 0,5 | 5,23 | 7,5 | 78 | 41 | 120 | 4,1 | 0,03 | 10,00 | 0,49 | |
| Cusfab | 28 | 12,8 | 1,68 | 0,92 | 11,5 | 30000 | 1980000 | 26 | <2 | 12 | 46 | 0,01 | 0,06 | 0,4 | 2,1 | 0,1 | -0,09 | 0,005 | 0,15 | 0,19 | 0,26 | 5,18 | 9,4 | 78 | 8 | 88 | 4,7 | 0,03 | 2,50 | 0,36 | |
| Chifar | 8 | 4 | 1,38 | 0,77 | <2 | <1 | 4750 | 20 | <2 | 9 | 8 | 0,03 | 0,07 | 0,2 | 0,4 | <0,03 | -0,02 | 0,005 | 0,02 | <0,54 | 0,16 | 10,46 | 1,31 | <35 | 6 | <35 | 4,1 | 0,00 | 0,90 | 0,32 | |
| Chifab | 3 | <1,6 | 1,84 | 0,92 | <2 | 100 | 5980 | 14 | <2 | 10 | 4 | 0,05 | 0,08 | 0,17 | 0,37 | <0,03 | -0,03 | 0,018 | 0,03 | <0,54 | 0,17 | 15,09 | 1,56 | <35 | <5 | <35 | 4,5 | 0,07 | 10,00 | 0,27 | |

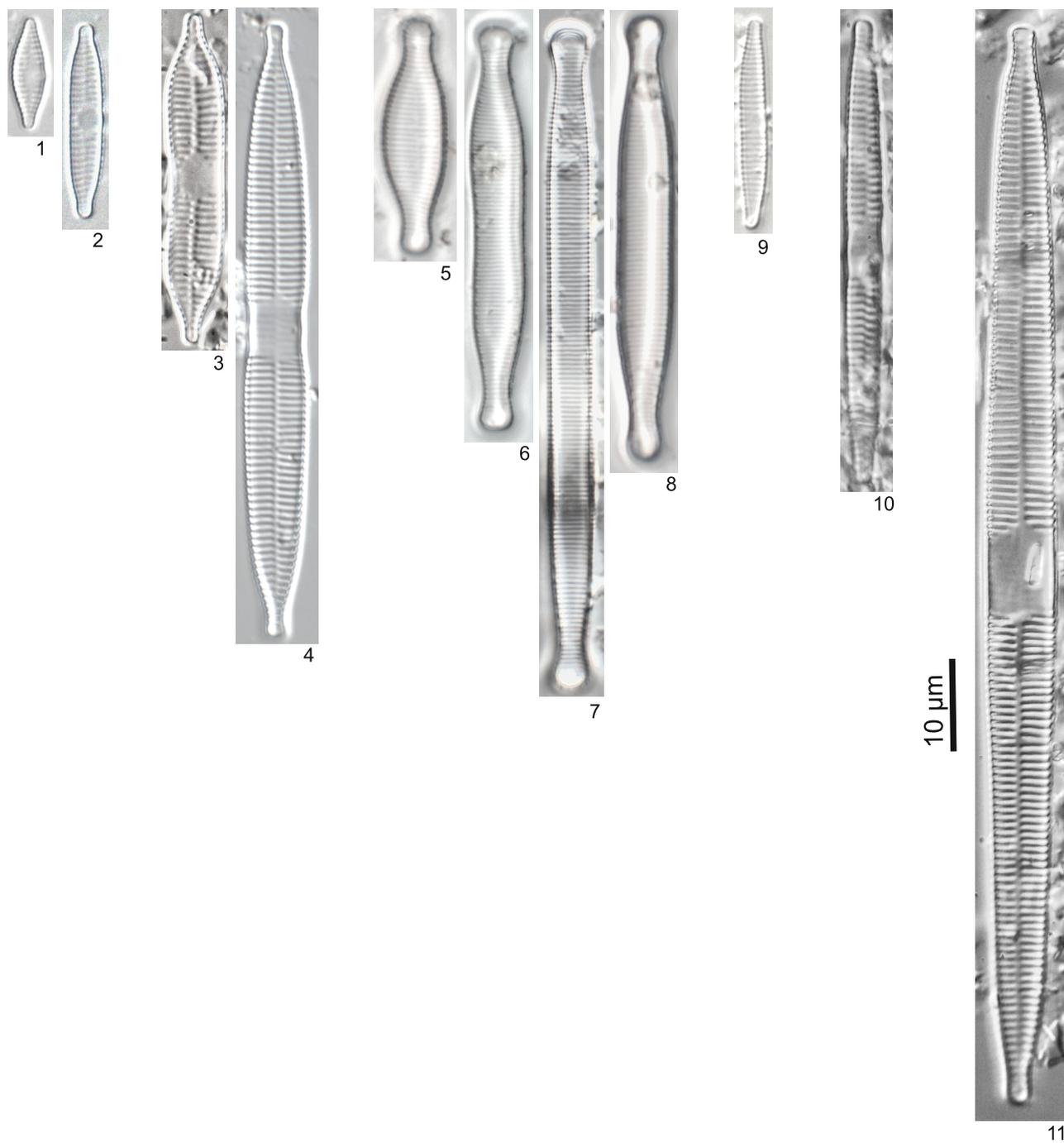
Anexo C. Morfotipos encontrados en las muestras con su nombre y autor y el rótulo asignado para el Análisis de Correspondencia Canónica

| Rótulo | Nombre / Autor | Rótulo | Nombre / Autor |
|---------------|--|---------------|--|
| Achnmi | Achnanthydium minutissimum (Kützing) Czarnecki sensu lato | Encyp2 | Encyonopsis sp.2 |
| Actin1 | Actinella sp.1 | Encype | Encyonema aff. perpusillum (Cleve-Euler) Mann |
| Adlacf | cf. Adlafia | Encysi | Encyonema silesiacum (Bleish) Mann |
| Adlaf1 | Adlafia sp.1 | Encysm | Encyonema cf. simile Krammer |
| Ampho1 | Amphora sp.1 | Eolisp | Eolimna spp |
| Bracbr | Brachysira brebissonii Ross sensu lato | Eolisu | Eolimna cf. subminuscula (Manguin) Moser, Lange-Bertalot & Metzeltin |
| Brach1 | Brachysira sp.1 | Eunobo | Eunotia aff. borealpina Lange-Bertalot & Nörpel-Schempp |
| Brach2 | Brachysira sp.2 | Eunoge | Eunotia cf. georgii Metzeltin & Lange- Bertalot |
| Calon1 | Caloneis sp.1 | Eunomu | Eunotia aff. mucophila (Lange-Bertalot & Nörpel-Schempp) Lange-Bertalot |
| Cavips | Cavinula pseudoscutiformis (Hustedt) Mann & Stickle | Eunono | Eunotia aff. novaisiae Lange-Bertalot & Luc Ector |
| Chambr | Chamaepinularia aff. brassilianopsis Metzeltin & Lange-Bertalot | Eunopa | Eunotia parasiolii Metzeltin & Lange- Bertalot |
| Coccp1 | Cocconeis placentula Ehrenberg | Eunosu | Eunotia cf. subrobusta Hustedt |
| Crati1 | Craticula sp.1 | Eunot1 | Eunotia sp.1 |
| Crati2 | Craticula sp.2 | Eunot2 | Eunotia sp.2 |
| Crati3 | Craticula sp.3 | Eunot3 | Eunotia sp.3 |
| Cratsb | Craticula cf. submolesta (Hustedt) Lange- Bertalot | Eunot4 | Eunotia sp.4 |
| Cymbe1 | Cymbella sp.1 | Eunot5 | Eunotia sp.5 |
| Cymbtr | Cymbella turgidula Grunow | Eunot6 | Eunotia sp.6 |
| Cymbtu | Cymbella tumida (Brébisson) Van Heurck | Eunot7 | Eunotia sp.7 |
| Diadco | Diadesmis confervacea Kützing | Eunot8 | Eunotia sp.8 |
| Encpfr | Encyonopsis cf. frequentis Krammer | Eunovi | Eunotia cf. vixexigua Metzeltin & Lange- Bertalot |
| Encsm2 | Encyonema cf. simile Krammer M2 | Fallcf | cf. Fallacia |
| Encyan | Encyonema aff. angustecapitatum Krammer | Fraggo | Fragilaria gouldarii (Brébisson) Lange- Bertalot |
| Encyla | Encyonema lange-Bertalotti Krammer | Fragi1 | Fragilaria sp.1 |
| Encyo1 | Encyonema sp.1 | Fragja | Fragilaria javanica Hustedt |
| Encyo2 | Encyonema sp.2 | Fragva | Fragilaria cf. vaucheriae (Kützing) Petersen |
| Encyo3 | Encyonema sp.3 | Fruscn | Frustulia cf. crassinervia (Brébisson) Lange-Bertalot & Krammer |

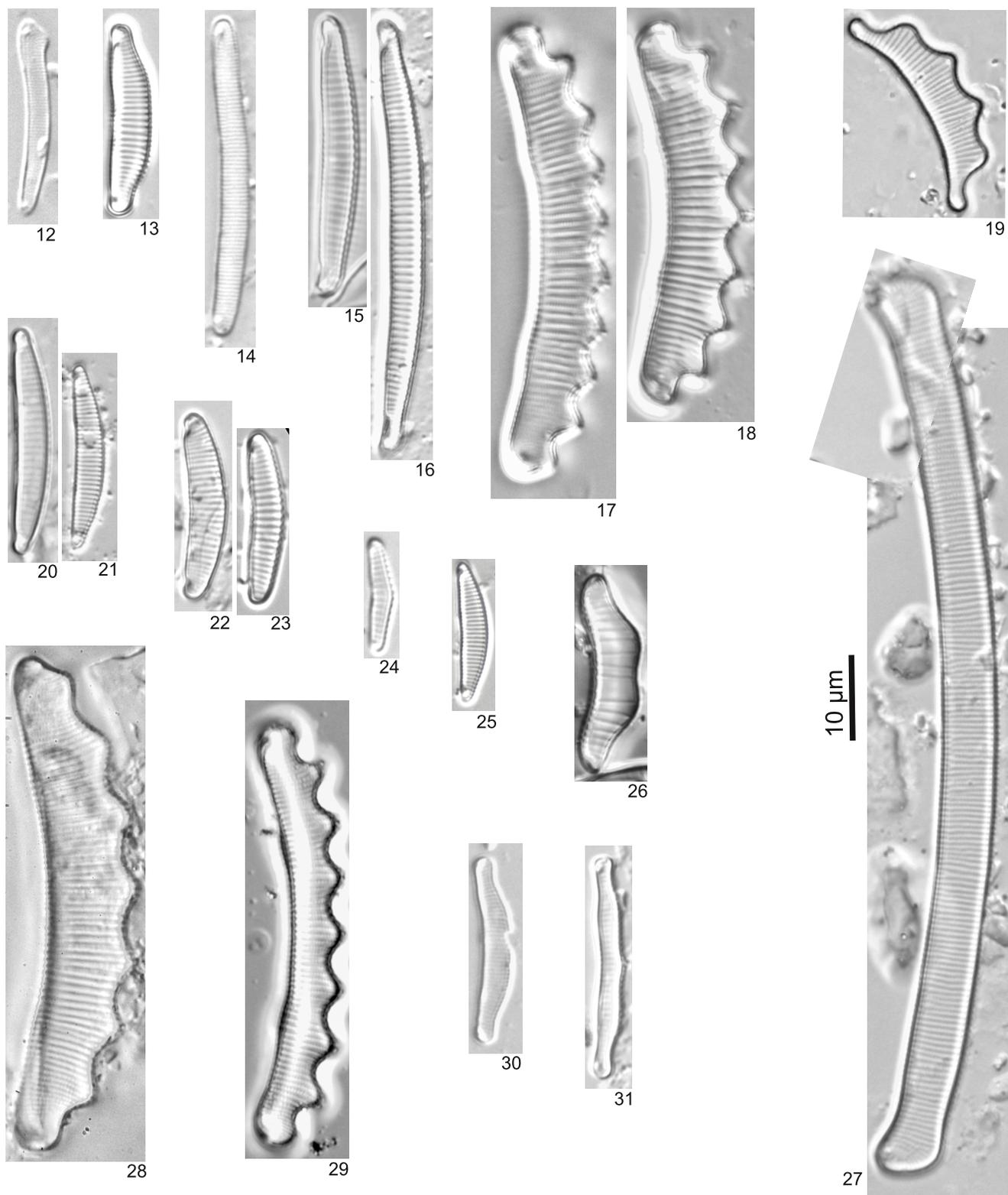
| Rótulo | Nombre / Autor | Rótulo | Nombre / Autor |
|---------------|---|---------------|--|
| Encyp1 | Encyonopsis sp.1 | Fruscp | Frustulia cf. crassipunctata Metzeltin & Lange-Bertalot |
| Frust1 | Frustulia sp.1 | Navdt4 | Naviculadicta sp.4 |
| Frust2 | Frustulia sp.2 | navic1 | Navicula sp.1 |
| Frusun | Frustulia undosa Metzeltin & Lange-Bertalot | Navic2 | Navicula sp.2 |
| Geisde | Geissleria decussis (Østrup) Lange-Bertalot & Metzeltin | Navicc | Navicula cf. cryptocephala Kützing |
| Geisne | Geissleria neotropica Metzeltin & Lange-Bertalot | Navict | Navicula cryptotenella Lange-Bertalot |
| Gompac | Gomphonema archaeovibrio f. cuneatum Metzeltin & Lange-Bertalot | Navihe | Navicula cf. heimansioides Lange-Bertalot |
| Gompar | Gomphonema archaeovibrio Lange-Bertalot & Reichardt | Navino | Navicula notha Wallace |
| Gompco | Gomphonema costei Metzeltin & Lange-Bertalot | Naviro | Navicula rostellata Kützing |
| Gomph1 | Gomphonema sp.1 | Navise | Navicula aff. seminulum Grunow |
| Gomph2 | Gomphonema sp.2 | Navisy | Navicula symmetrica Patrick |
| Gomph3 | Gomphonema sp.3 | Navive | Navicula cf. veneta Kützing |
| Gomph4 | Gomphonema sp.4 | Neidi1 | Neidium sp.1 |
| Gomph5 | Gomphonema sp.5 | Nitzal | Nitzschia cf. alpinobacillum Lange-Bertalot |
| Gomph6 | Gomphonema sp.6 | Nitzs1 | Nitzschia sp.1 |
| Gomph7 | Gomphonema sp.7 | Nitzs2 | Nitzschia sp.2 |
| Gomph8 | Gomphonema sp.8 | Nitzs3 | Nitzschia sp.3 |
| Gompl2 | Gomphonema parvulum (Kützing) Kützing sensu lato M2 | Nitzsp | Nitzschia spp |
| Gompla | Gomphonema lagenula Kützing | Nitzva | Nitzschia valdestriata Aleem & Hustedt |
| Gompne | Gomphonema cf. neonasutum Lange-Bertalot & Reichardt | Nupeac | Nupela acaciensis Vouilloud & Sala |
| Gomppa | Gomphonema parvulum (Kützing) Kützing sensu lato | Nupel1 | Nupela sp.1 |
| Gomppu | Gomphonema pumilum (Grunow) Reichardt & Lange-Bertalot sensu lato | Nupel2 | Nupela sp.2 |
| Gyroac | Gyrosigma cf. acuminatum (Kützing) Rabenhorst | Nupel3 | Nupela sp.3 |
| Kobasp | Kobayasiella spp | Nupel4 | Nupela sp.4 |
| Lutico | Luticola aff. costei Metzeltin & Lange-Bertalot | Nupepa | Nupela aff. paludigena (Scherer) Lange-Bertalot |
| Lutige | Luticola goeppertiana (Bleisch in Rabenhorst) Mann | Nupesu | Nupela subpallavicinii Metzeltin & Lange-Bertalot |
| Lutimu | Luticola cf. muticoides (Hustedt) Man | Pindi2 | Pinnularia aff. divergentissima (Grunow) Cleve M2 |
| Mayam1 | Mayamaea sp.1 | Pinndi | Pinnularia aff. divergentissima (Grunow) Cleve M1 |
| Navdna | Naviculadicta nanogomphonema Lange-Bertalot | Pinngr | Pinnularia cf. graciloides var. latecapitata Metzeltin & Krammer |

| Rótulo | Nombre / Autor | Rótulo | Nombre / Autor |
|----------------|--|---------------|--|
| Navdt1 | Naviculadicta sp.1 | Pinme | Pinnularia cf. mesolepta (Ehrenberg) W. Smith |
| Navdt2 | Naviculadicta sp.2 | Pinnpi | Pinnularia pisciculus var. angusta Metzeltin & Krammer |
| Navdt3 | Naviculadicta sp.3 | Pinnps | Pinnularia pseudonavicula Metzeltin & Lange-Bertalot |
| Pinnsb | Pinnularia subcapitata Gregory | Rhopgi | Rhopalodia aff. gibberula (Ehrenberg) Otto Müller |
| Pinnscl | Pinnularia cf. subcapitata Gregory | Sella1 | Sellaphora sp.1 |
| Pinnsu | Pinnularia aff. sudetica (Hilse) Hilse | Sella2 | Sellaphora sp.2 |
| Pinnte | Pinnularia tenuistriata Hustedt | Sellp2 | Sellaphora pupula (Kützing) Mereschkowsky M2 |
| Pinnu1 | Pinnularia sp.1 | Sellpu | Sellaphora pupula (Kützing) Mereschkowsky M1 |
| Pinnu2 | Pinnularia sp.2 | Stende | Stenopterobia cf. delicatissima (Lewis) Van Heurck |
| Pinnu3 | Pinnularia sp.3 | Steno1 | Stenopterobia sp.1 |
| Pinnu4 | Pinnularia sp.4 | Steno2 | Stenopterobia sp.2 |
| Pinnu5 | Pinnularia sp.5 | Steno3 | Stenopterobia sp.3 |
| Placo1 | Placoneis sp.1 | Surir1 | Surirella sp.1 |
| Placo2 | Placoneis sp.2 | Surir2 | Surirella sp.2 |
| Placop | Placoneis aff. opportuna (Hustedt) Lange-Bertalot | Surir3 | Surirella sp.3 |
| Placsy | Placoneis symmetrica (Hustedt) Lange-Bertalot | Ulnar1 | Ulnaria sp.1 |
| Planbi | Planothidium cf. biporum (Hohn & Hellerman) Lange-Bertalot | Ulnaul | Ulnaria ulna (Nitzsch) Compère sensu lato |
| eimsi | Reimeria sinuata (Gregory) Kociolek & Stoermer emend Sala, Guerrero & Ferrario | | |

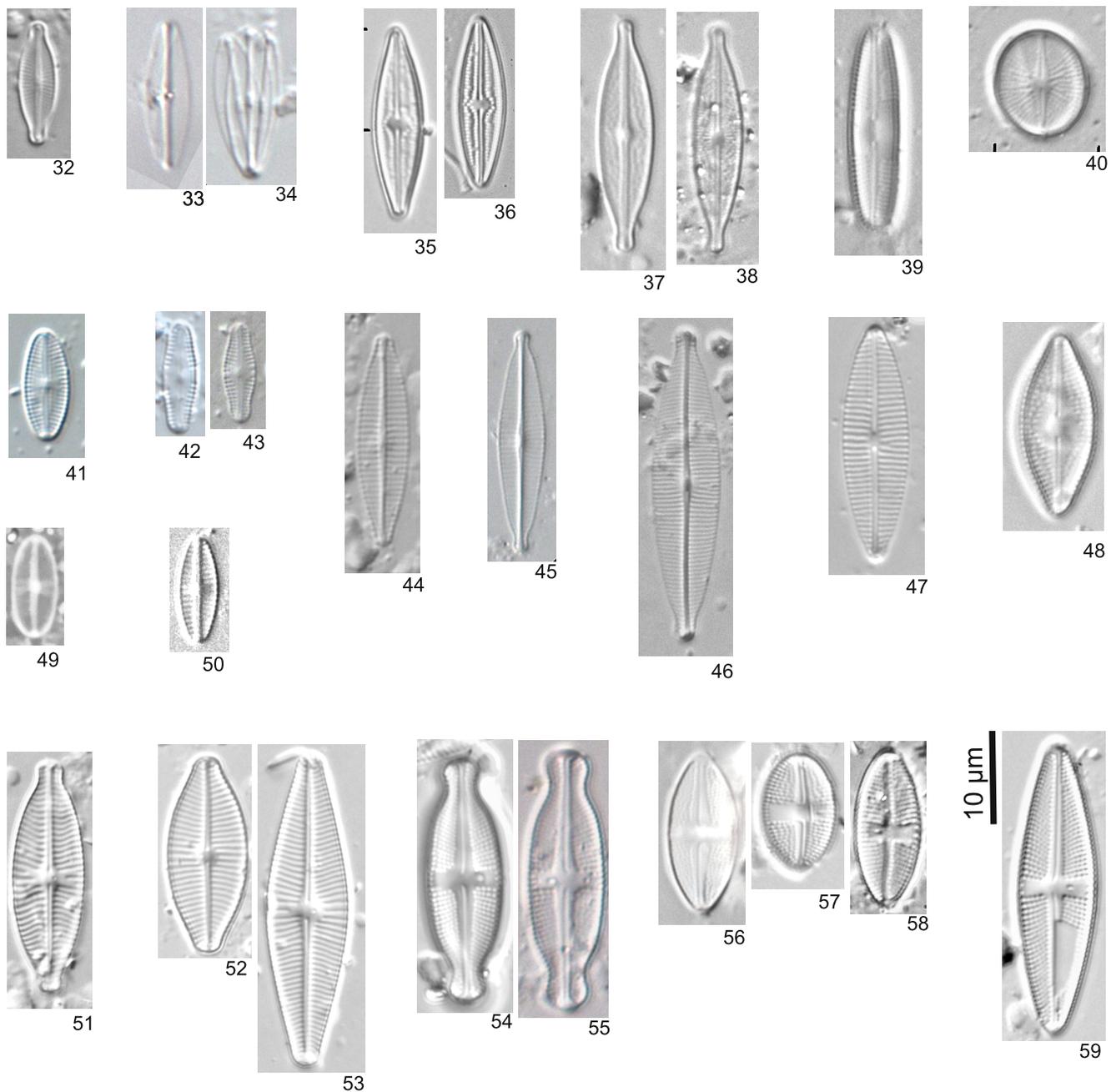
**ANEXO D. ICONOGRAFÍA DE LAS DIATOMEAS MÁS COMUNES
ENCONTRADAS EN EL ESTUDIO**



FRAGILARIALES. Figuras 1-2. *Fragilaria cf. vaucheriae* (Kützing) Petersen. Figuras 3-4. *Fragilaria goulardii* (Brébisson) Lange-Bertalot. Figuras 5-8. *Fragilaria javanica* Hustedt. Figura 9. *Fragilaria* sp1. Figura 10. *Ulnaria* sp1. Figura 11. *Ulnaria ulna* (Nitzsch) Compère sensu lato.



EUNOTIALES. Figura 12. *Actinella* sp1. Figura 13. *Eunotia* aff. *borealpina* Lange-Bertalot & Nörpel-Schempp. Figura 14. *Eunotia* aff. *mucophila* (Lange-Bertalot & Nörpel-Schempp) Lange-Bertalot. Figuras 15-16. *Eunotia* aff. *novaisiae* Lange-Bertalot & Luc Ector. Figuras 17-18. *Eunotia* cf. *georgii* Metzeltin & Lange-Bertalot. Figura 19. *Eunotia* cf. *subrobusta* Hustedt (sin escala). Figuras 20-21. *Eunotia* cf. *vixexigua* Metzeltin & Lange-Bertalot. Figuras 22-23. *Eunotia* *parasiolii* Metzeltin & Lange-Bertalot. Figura 24. *Eunotia* sp1. Figura 25. *Eunotia* sp2. Figura 26. *Eunotia* sp3. Figura 27. *Eunotia* sp4. Figura 28. *Eunotia* sp5. Figura 29. *Eunotia* sp6. Figura 30. *Eunotia* sp7. Figura 31. *Eunotia* sp8.



NAVICULALES. Figura 32. *Adlafia* sp1. Figuras 33-34. cf. *Adlafia*. Figura 35-36. *Brachysira brebissonii* Ross sensu lato. Figuras 37-38. *Brachysira* sp1. Figura 39. *Caloneis* sp1. Figura 40. *Cavinula pseudoscutiformis* (Hustedt) Mann & Stickler. Figuras 41. cf. *Fallacia*. Figura 42-43. *Chamaepinularia* aff. *brasilianopsis* Metzeltin & Lange-Bertalot. Figura 44. *Craticula* cf. *submolesta* (Hustedt) Lange-Bertalot. Figura 45. *Craticula* sp1. Figura 46. *Craticula* sp2. Figura 47. *Craticula* sp3. Figura 48. *Diadesmis confervacea* Kützing. Figura 49. *Eolimna* cf. *subminuscula* (Manguin) Moser, Lange-Bertalot & Metzeltin. Figura 50. *Eolimna* spp. Figura 51. *Geissleria decussis* (Østrup) Lange-Bertalot & Metzeltin. Figura 52-53. *Geissleria neotropica* Metzeltin & Lange-Bertalot. Figura 54-55. *Luticola* aff. *costei* Metzeltin & Lange-Bertalot. Figura 56-58. *Luticola* cf. *muticoides* (Hustedt) Man. Figura 59. *Luticola goeppertiana* (Bleisch in Rabenhorst) Mann.

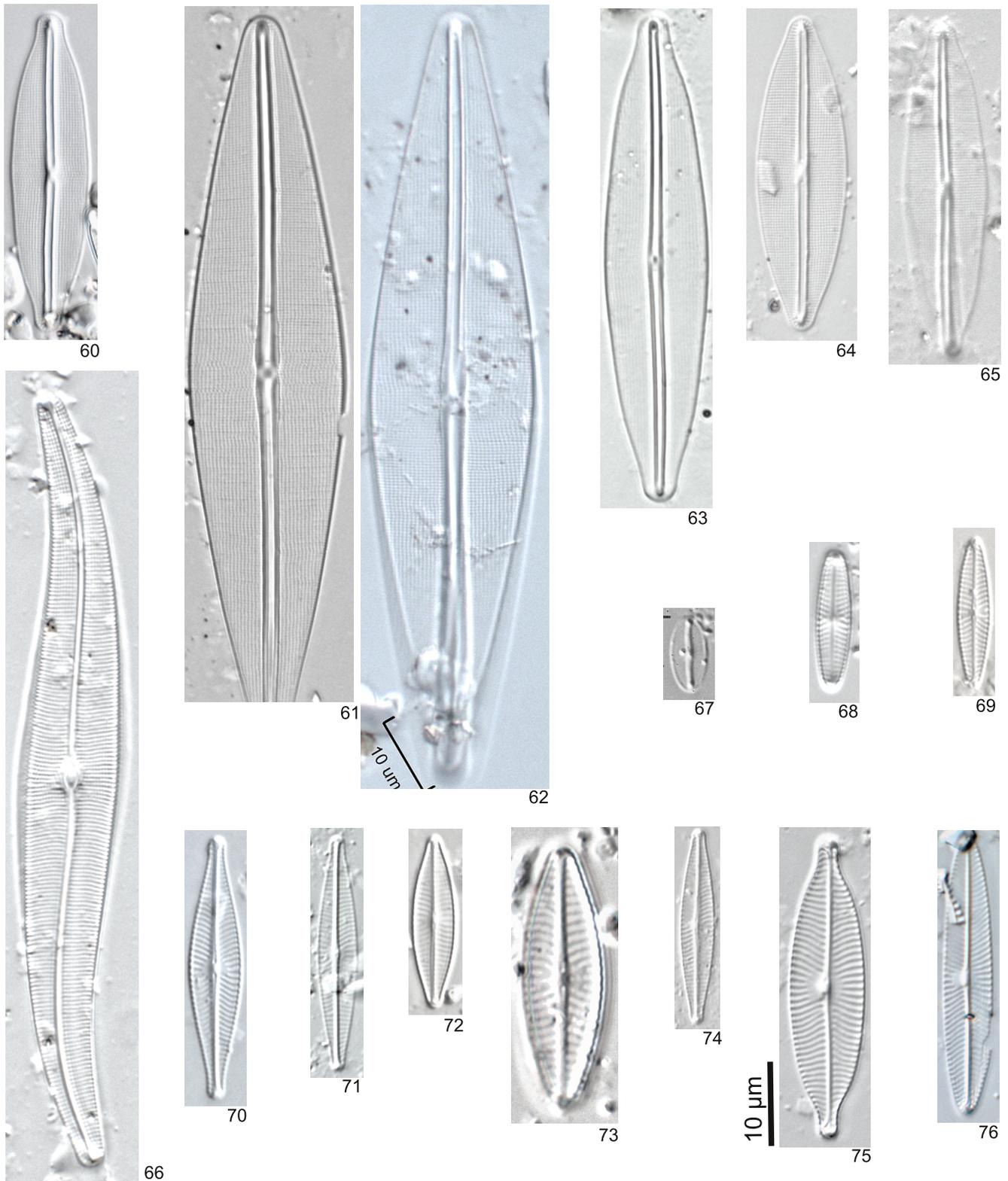


Figura 60. *Frustulia* cf. *crassinervia* (Brébisson) Lange-Bertalot & Krammer. Figuras 61-62. *Frustulia* cf. *crassipunctata* Metzeltin & Lange-Bertalot. Figura 63. *Frustulia* sp1. Figura 64. *Frustulia* sp2. Figura 65. *Frustulia undosa* Metzeltin & Lange-Bertalot. Figura 66. *Gyrosigma* cf. *acuminatum* (Kützing) Rabenhorst. Figura 67. *Mayamaea* sp1. Figura 68. *Navicula* sp1. Figura 69. *Navicula* sp2. Figura 70. *Navicula* cf. *cryptocephala* Kützing. Figura 71. *Navicula* cf. *heimansioides* Lange-Bertalot. Figura 72. *Navicula* cf. *veneta* Kützing. Figura 73. *Navicula cryptotenella* Lange-Bertalot. Figura 74. *Navicula nota* Wallace. Figura 75. *Navicula rostellata* Kützing. Figura 76. *Navicula symmetrica* Patrick.

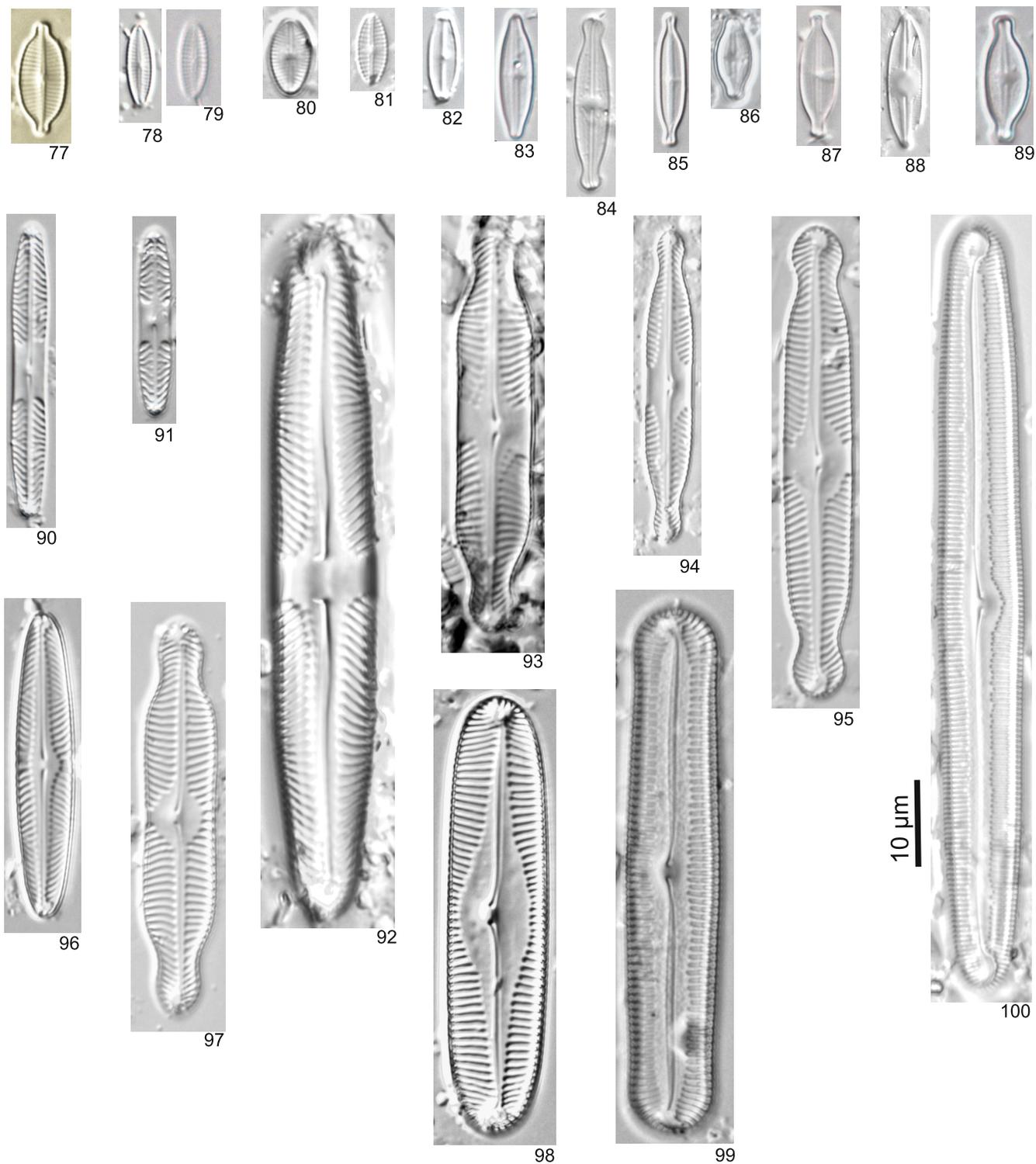


Figura 77. *Naviculadicta nanogomphonema* Lange-Bertalot. Figuras 78-79. *Naviculadicta* sp1. Figura 80. *Naviculadicta* sp2.
 Figura 81. *Naviculadicta* sp3. Figura 82. *Naviculadicta* sp4. Figura 83. *Nupela acaciensis* Vouilloud & Sala. Figura 84. *Nupela*
aff. paludigena (Scherer) Lange-Bertalot. Figura 85. *Nupela* sp1. Figura 86. *Nupela* sp2. Figura 87. *Nupela* sp3. Figura 88.
Nupela sp4. Figura 89. *Nupela subpallavicinii* Metzeltin & Lange-Bertalot. Figura 90. *Pinnularia aff. divergentissima* (Grunow)
 Cleve M1. Figuras 91. *Pinnularia aff. divergentissima* (Grunow) Cleve M2. Figura 92. *Pinnularia cf. graciloides* var.
latecapitata Metzeltin & Krammer. Figura 93. *Pinnularia cf. mesolepta* (Ehrenberg) W. Smith. Figura 94. *Pinnularia cf.*
subcapitata Gregory. Figura 95. *Pinnularia pisciculus* var. *angusta* Metzeltin & Krammer. Figura 96. *Pinnularia*
pseudonavicula Metzeltin & Lange-Bertalot. Figura 97. *Pinnularia* sp2. Figura 98. *Pinnularia* sp4. Figura 99. *Pinnularia* sp5.
 Figura 100. *Pinnularia tenuistriata* Hustedt.

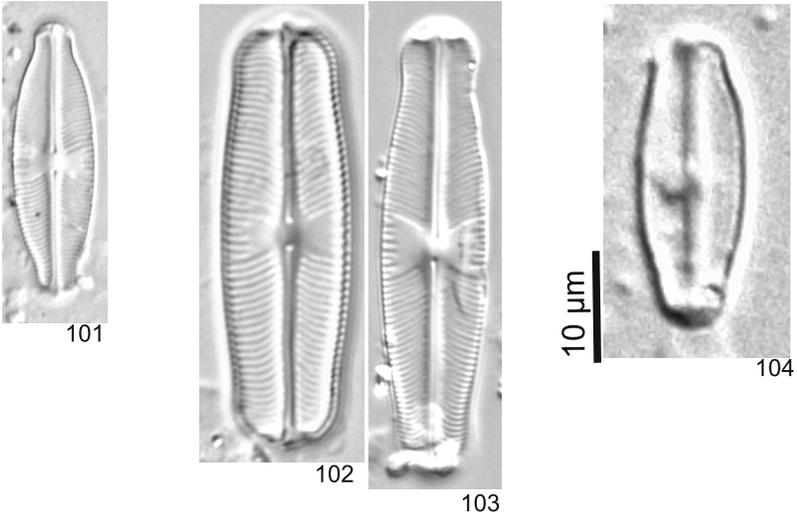
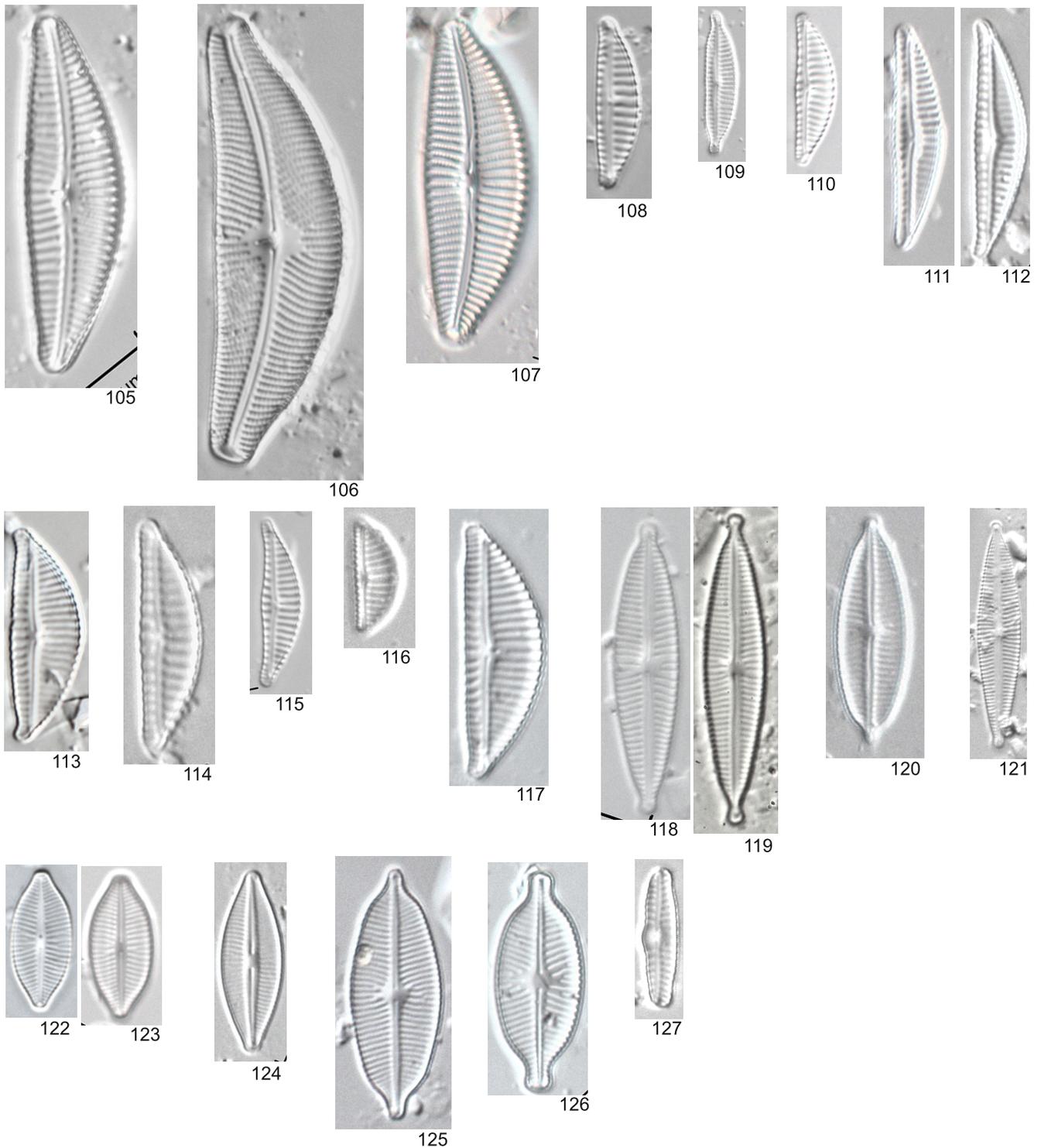


Figura 101. *Sellaphora pupula* (Kützing) Mereschkowsky M1. Figuras 102-103. *Sellaphora pupula* (Kützing) Mereschkowsky M2. Figura 104. *Sellaphora* sp1 (sin escala).



CYMBELACEAS. Figura 105. *Cymbella* sp1. Figura 106. *Cymbella tumida* (Brébisson) Van Heurck. Figura 107. *Cymbella turgidula* Grunow. Figura 108. *Encyonema* aff *angustecapitatum* Krammer. Figura 109. *Encyonema* aff. *perpusillum* (Cleve-Euler) Mann. Figuras 110. *Encyonema* cf. *simile* Krammer M2. Figura 111-112. *Encyonema* cf. *simile* Krammer. Figura 113. *Encyonema lange-Bertalotti* Krammer. Figura 114. *Encyonema silesiacum* (Bleish) Mann. Figura 115. *Encyonema* sp1. Figura 116. *Encyonema* sp2. Figura 117. *Encyonema* sp3. Figuras 118-119. *Encyonopsis* cf. *frecuentis* Krammer Figura 120. *Encyonopsis* sp1. Figura 121. *Encyonopsis* sp2. Figuras 122-123. *Placoneis* aff. *opportuna* (Hustedt) Lange-Bertalot. Figura 124. *Placoneis* sp1. Figura 125. *Placoneis* sp2. Figura 126. *Placoneis symmetrica* (Hustedt) Lange-Bertalot. Figura 127. *Reimeria sinuata* (Gregory) Kociolek & Stoermer emend Sala, Guerrero & Ferrario.

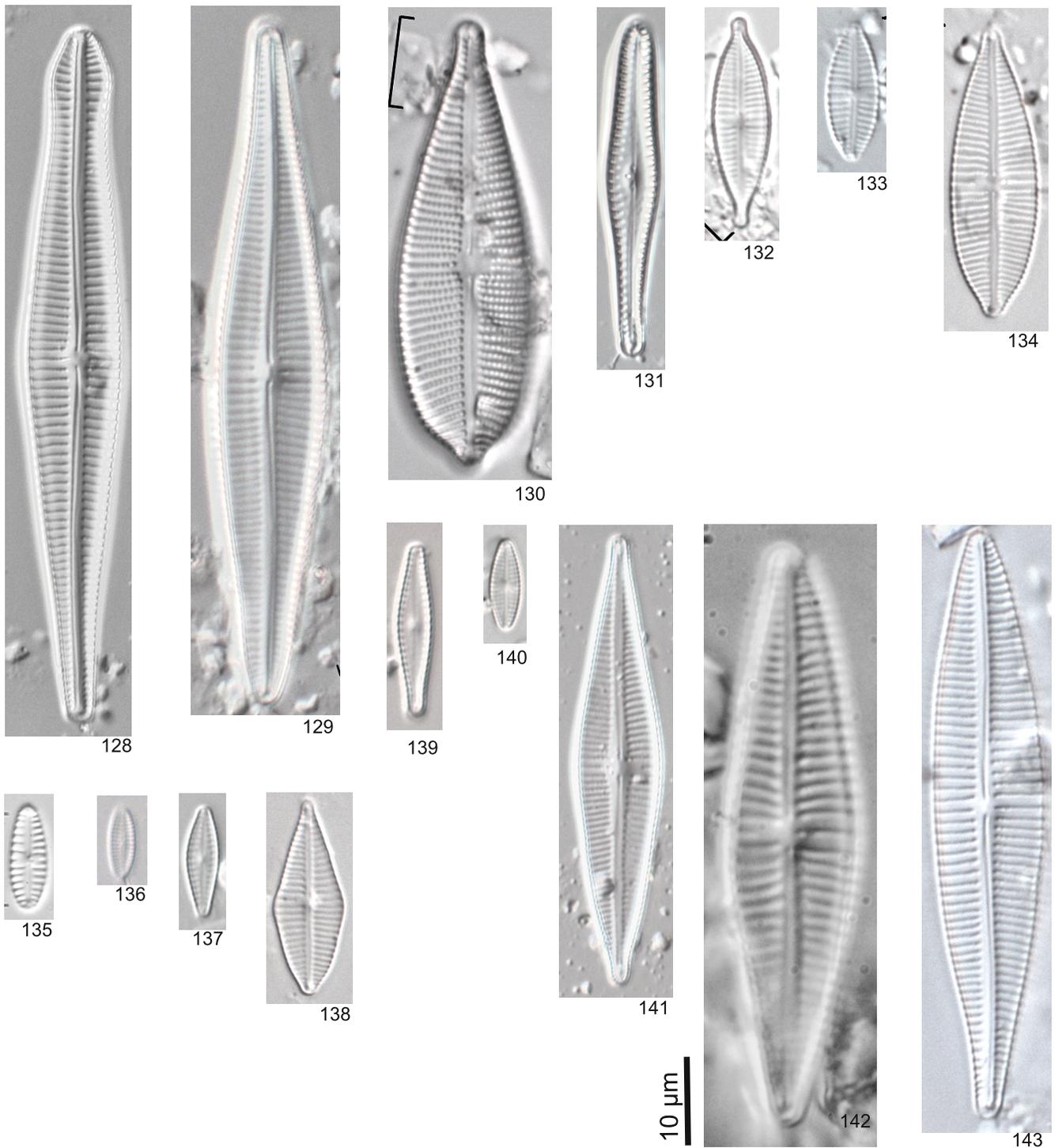
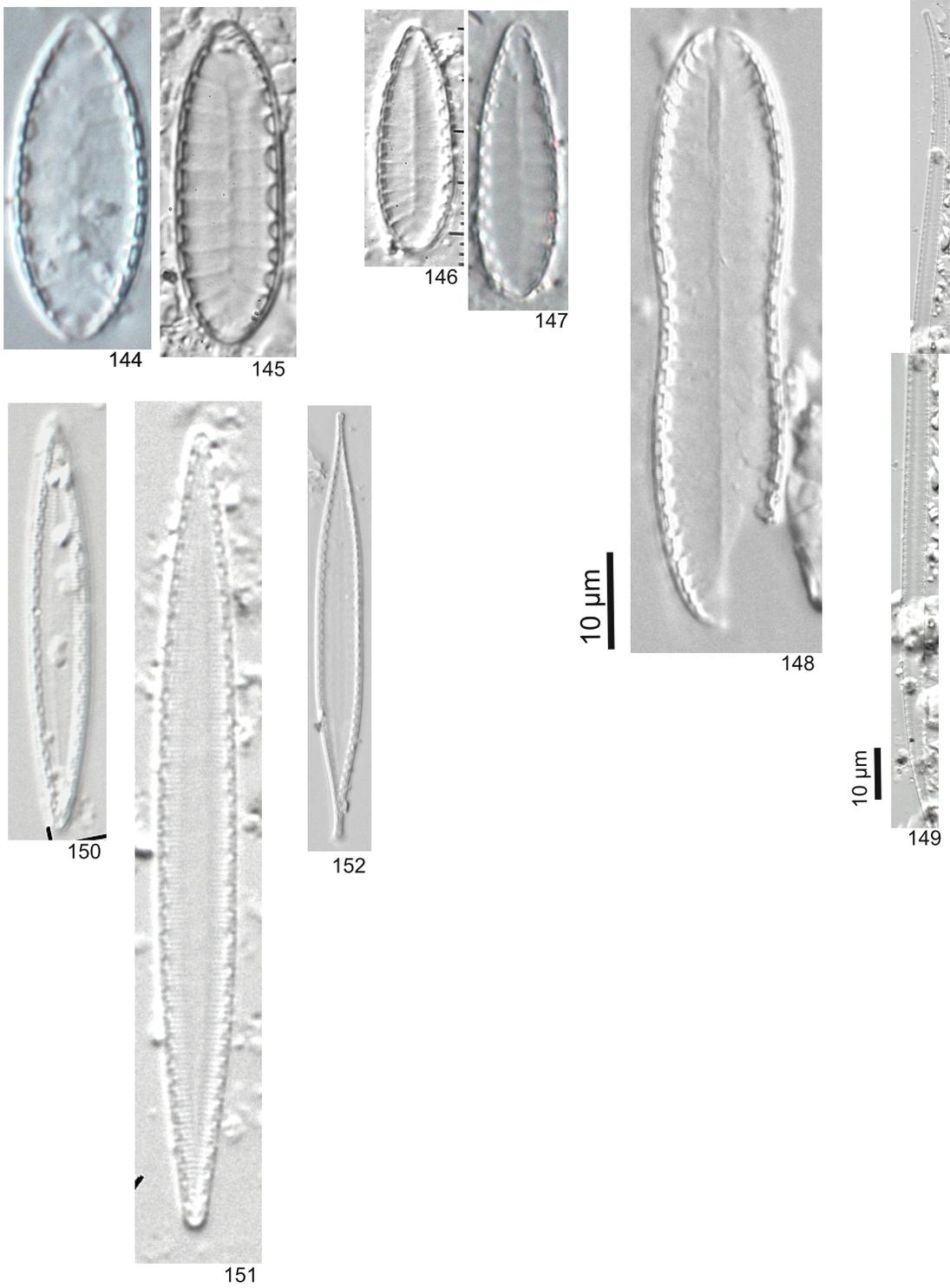


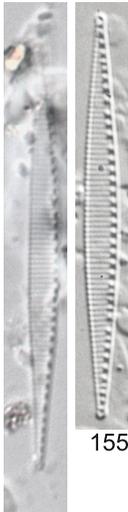
Figura 128. *Gomphonema archaeovibrio* f. *cuneatum* Metzeltin & Lange-Bertalot. Figura 129. *Gomphonema archaeovibrio* Lange-Bertalot & Reichardt. Figura 130. *Gomphonema* cf. *neonasutum* Lange-Bertalot & Reichardt. Figura 131. *Gomphonema costei* Metzeltin & Lange-Bertalot. Figura 132. *Gomphonema lagenula* Kützing. Figura 133. *Gomphonema parvulum* (Kützing) Kützing sensu lato M2. Figura 134. *Gomphonema parvulum* (Kützing) Kützing sensu lato. Figura 135. *Gomphonema pumilum* (Grunow) Reichardt & Lange-Bertalot sensu lato. Figura 136. *Gomphonema* sp1. Figura 137. *Gomphonema* sp2. Figura 138. *Gomphonema* sp3. Figura 139. *Gomphonema* sp4. Figura 140. *Gomphonema* sp5. Figura 141. *Gomphonema* sp6. Figura 142. *Gomphonema* sp7. Figura 143. *Gomphonema* sp8.



SURIRELLALES. Figura 144-145. *Surirella* sp1. Figuras 146-147. *Surirella* sp2. Figura 148. *Surirella* sp3. Figura 149. *Stenopterobia* sp1. Figura 150. *Stenopterobia* sp2. Figura 151. *Stenopterobia* sp3. Figura 152. *Stenopterobia* cf. *delicatissima* (Lewis) Van Heurck.



153



154

155



156



157



158



159



160



161



162



163



164



165

BACILARIALES. Figura 153. *Nitzschia* cf. *alpinobacillum* Lange-Bertalot. Figuras 154-155. *Nitzschia* sp.1. Figura 156. *Nitzschia* sp2. Figura 157. *Nitzschia* sp3. Figura 158-161. *Nitzschia* spp. Figuras 162-163. *Nitzschia valdestriata* Aleem & Hustedt. THALASSIOFYSALES. Figura 164. *Amphora* sp1. RHOPALODIALES. Figura 165. *Rhopalodia* aff. *gibberula* (Ehrenberg) Otto Müller.

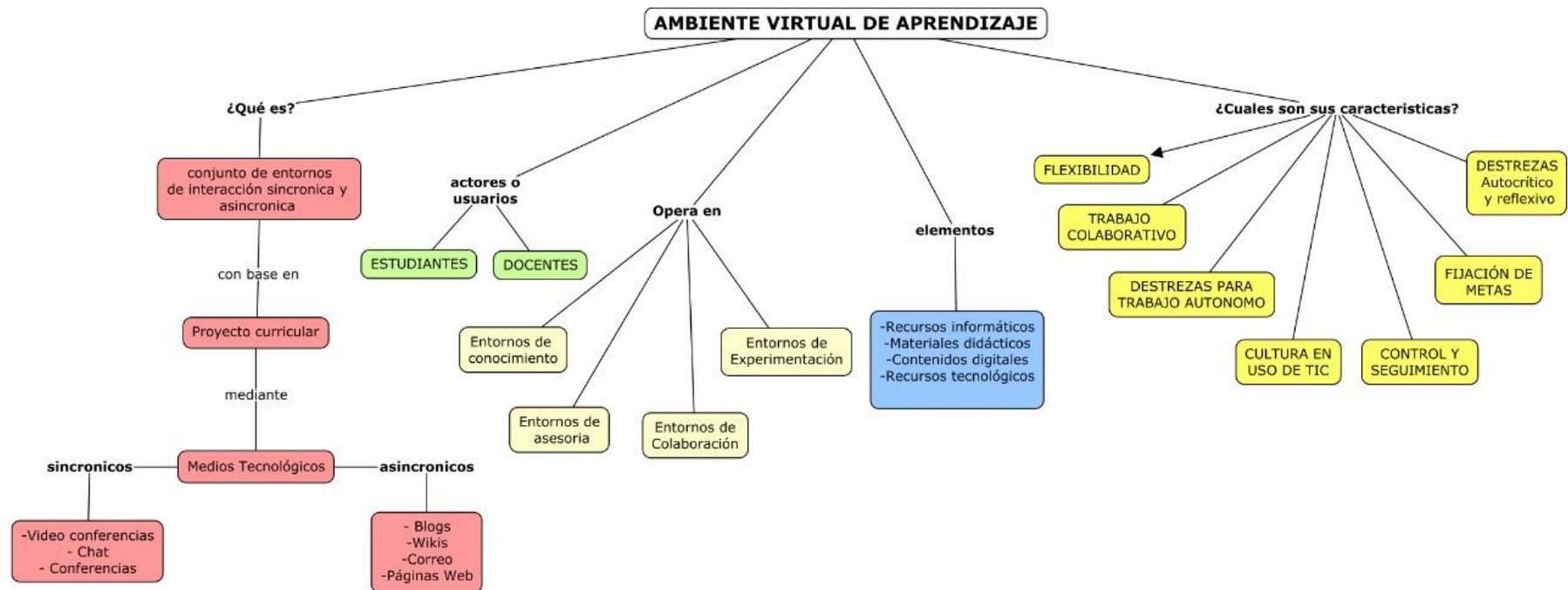
ANEXO E. COMPONENTE PEDAGÓGICO

Diseño y Desarrollo de un AVA (Ambiente Virtual de Aprendizaje) para la Enseñanza - Aprendizaje de la Ecología de los Ecosistemas de Agua Dulce

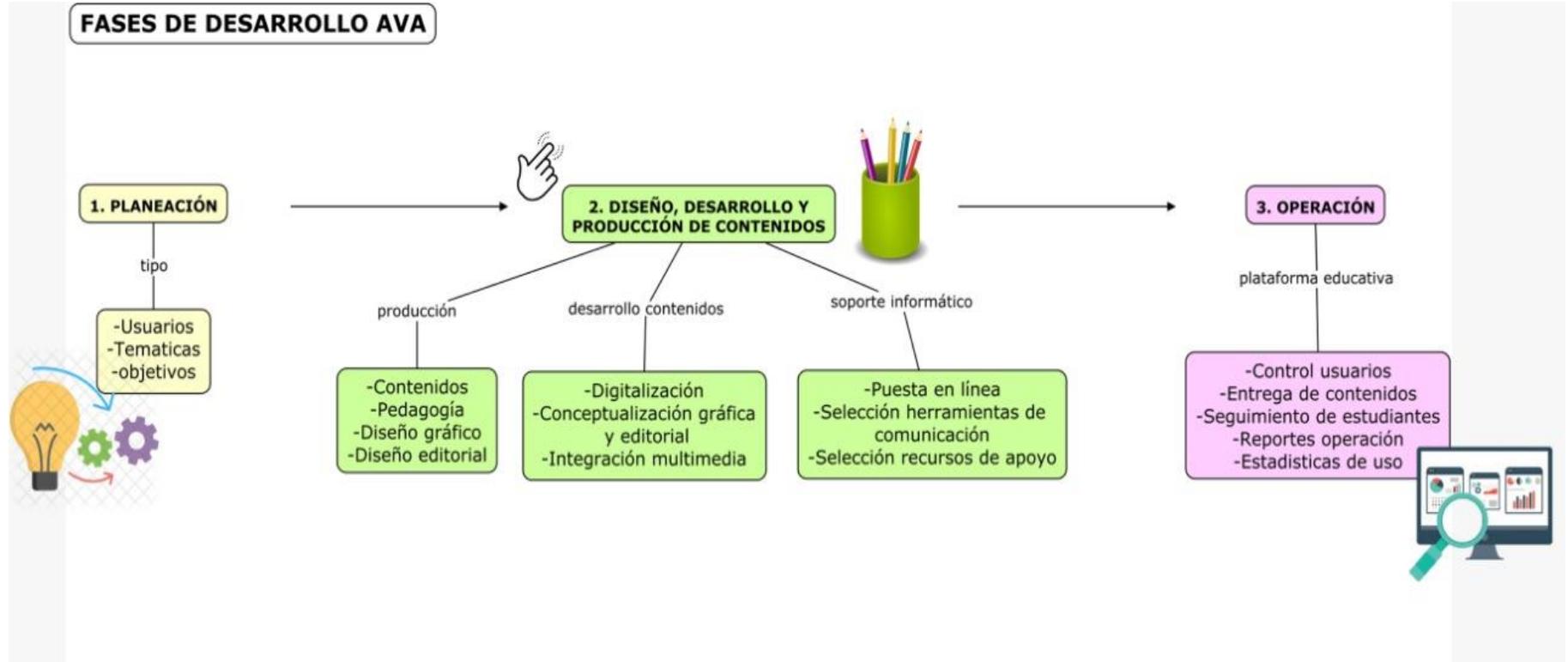
Objetivo

Diseñar un ambiente de aprendizaje virtual que integre en el tiempo y en el espacio los elementos como el contenido, la interacción, la evaluación, el seguimiento y la orientación para el aprendizaje de la ecología de los ecosistemas de agua dulce.

Ambiente de aprendizaje virtual



Proceso de diseño y desarrollo



Publicación del recurso virtual:

<http://cienciambiental.wixsite.com/diatomeas>