



**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE
BAJA CALIFORNIA**

FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLOGICAS

**“Geoquímica de la cuenca estuarina del río Colorado:
 $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ y biomarcadores lipídicos en sedimentos
superficiales”**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE DOCTOR
EN CIENCIAS EN OCEANOGRAFIA COSTERA**

PRESENTA:

M. C. SERGIO AGUÍÑIGA GARCÍA

Ensenada, B.C.

23 de Junio de 1999

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA
CALIFORNIA
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLOGICAS**

**“Geoquímica de la cuenca estuarina del río Colorado:
 $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ y biomarcadores lipídicos en sedimentos
superficiales”**

**TESIS
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE DOCTOR
EN CIENCIAS EN OCEANOGRAFIA COSTERA**

PRESENTA:

M. C. SERGIO AGUÍÑIGA GARCÍA

Ensenada, B.C.

23 de junio de 1999

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS

“Geoquímica de la cuenca estuarina del río Colorado: $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ y biomarcadores lipídicos en sedimentos superficiales”

TESIS
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE DOCTOR
EN CIENCIAS EN OCEANOGRAFIA COSTERA

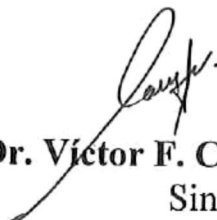
PRESENTA: **M. C. SERGIO AGUIÑIGA GARCÍA**



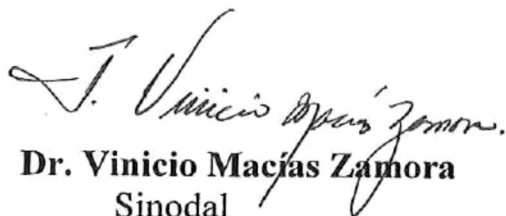
Dr. José D. Carriquiry Beltrán.
Presidente de Jurado



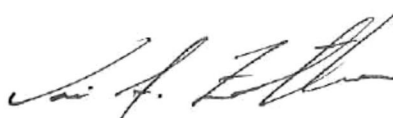
Dr. Walter Daesslé
Secretario



Dr. Víctor F. Camacho Ibar.
Sinodal



Dr. Vinicio Macías Zamora
Sinodal



Dr. José A. Zertuche González
Sinodal

RESUMEN

En esta investigación se estudió la composición geoquímica de la materia orgánica sedimentaria en la zona núcleo de la Reserva de la Biosfera del Delta del Río Colorado. Para evaluar las potenciales fuentes orgánicas y los patrones existentes de distribución, se analizaron biomarcadores lipídicos e isótopos estables de carbono y nitrógeno en los sedimentos superficiales de esta región.

La utilización de trazadores geoquímicos múltiples permitieron establecer áreas estadísticamente diferentes, indicando un gradiente espacial en la composición orgánica aparentemente definido por el patrón hidrodinámico dominante. Los resultados muestran que existe un gradiente suroeste-noroeste en la composición orgánica sedimentaria y que se incrementa a valores promedio más negativos de $\delta^{13}\text{C}$ (-19.7‰ a -21.8‰), más positivos de $\delta^{15}\text{N}$ (7.1‰ a 10.3‰), a razones C/N (6.7 a 10.6) y a menores tamaños de grano medio (3.8 a 4.6 ϕ); este gradiente indica un incremento gradual en la contribución de aportes orgánicos de origen terrestre en dirección a la costa de Baja California de esta área de estudio.

En los sedimentos superficiales de la costa de Sonora, los resultados de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ establecen que el origen del nitrógeno y carbono orgánico sedimentario es predominantemente fitoplanctónico. Los ácidos grasos poliénoicos de 18, 20 y 22 carbonos resolvieron que estas fuentes fitoplanctónicas están compuestas de diatomeas, prymnesiofitas y dinoflagelados. Los altos porcentajes de ácidos grasos provenientes de zooplancton y de bacterias sugieren que el pastoreo y la degradación bacteriana sobre un sustrato fitoplanctónico predominan en la costa sonorensis, hidrográficamente dominada por la entrada de aguas oceánicas.

En los sedimentos de la costa de Sonora, las altas razones monoinsaturados/ramificados y las bajas razones de iso y anteiso C15/C16 de ácidos grasos

provenientes de fosfolípidos indican condiciones predominantemente aeróbicas en áreas caracterizadas por altos aportes de microeucariontes.

La caracterización biogeoquímica de los sedimentos de la costa de Baja California permite relacionar las complejas mezclas orgánicas de esta matriz sedimentaria como un efecto evidente de las descargas terrígenas de la cuenca estuarina que se mezclan con los aportes oceánicos introducidos predominantemente a lo largo de la costa de Sonora.

La influencia del material proveniente de este proceso de mezcla, comprende la plataforma oceánica adyacente de Baja California (SW), con valores promedio de $\delta^{13}\text{C}$ (-20.81‰), $\delta^{15}\text{N}$ (8.5‰), razón C/N (6.6) y altos valores de tamaño de grano medio (6.8 phi). Los ácidos grasos ramificados en los sedimentos de ésta costa presentaron altas concentraciones de ácidos grasos bacterianos (~40%) sugiriendo que los procesos de remineralización pueden ser un proceso importante en la zona influenciada por la descarga de la cuenca estuarina.

Los resultados de los ácidos grasos de fosfolípidos son consistentes con lo anterior permitiendo definir que las mayores biomásas bacterianas asociadas a bajas razones de ácidos grasos monoinsaturados/ramificados y altas razones de iso+anteiso C15/C16 se encuentran predominantemente en la costa bajacaliforniana. Los resultados indican que en esta área existen condiciones predominantemente anaeróbicas, con menores contribuciones de eucariontes y altas biomásas bacterianas. Las mayores concentraciones de ácidos grasos, normalizados por unidad de carbono, en las estaciones directamente influenciadas por la descarga estuarina identifican un ambiente donde la producción heterótrofa asociada, pudiera representar un flujo energético importante hacia otros niveles tróficos.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo representa la culminación del esfuerzo conjunto de muchas personas y varias instituciones sin las cuales este trabajo no hubiera sido posible realizarse, y con las que estaré eternamente agradecido. Las condiciones bajo las cuales desarrollé este trabajo no son parecidas a las del resto de estudiantes doctorales de este programa, sin embargo, al concluir esta investigación, veo que este camino que estuvo lleno de retos desde el principio, me sirvió aún mas para valorar la delicada tarea que implica la investigación científica y el cumplimiento con altos estándares académicos. El haber estado involucrado con mi asesor de tesis en la creación, instalación y puesta en marcha del primer laboratorio en Latinoamérica de isótopos estables dedicado exclusivamente a investigaciones oceanográficas, ciertamente involucró grandes retos que fueron mas allá de una clásica investigación doctoral. Esta situación particular, aunque no apreciada en su verdadera dimensión por algunos, me ayudó singularmente en mi formación profesional. Por ello, deseo agradecer fraternalmente a mi asesor de tesis Dr. José Domingo Carriquiry Beltrán, por su invaluable ayuda, su persistente y persuasiva demanda de un trabajo de alta calidad, su permanente disposición a discutir ideas y resolver problemas de todo tipo, y a prestar ayuda inmediata e incondicional cuando así se lo solicité. Su apoyo y guianza durante esta investigación fueron esenciales para la consecución de las metas originalmente establecidas.

La investigación de mi tesis también se vió fuertemente favorecida por la invaluable ayuda prestada por el Dr. Víctor F. Camacho Ibar en los aspectos científicos de la geoquímica de ácidos grasos y de fosfolípidos, y sobre la geoquímica orgánica en general. Su interés, constante apoyo y disponibilidad a enseñarnos devolviéndonos de manera crítica las preguntas que le planteábamos, fueron ciertamente una invaluable fuente de creatividad analítica. Agradezco grandemente su amistad y ayuda académica.

La participación de mis sinodales, Dr. José A. Zertuche G., Dr. J. Vinicio Macías Z. y Dr. Mike J. Risk, le dieron a este trabajo un enfoque mas realista sobre las hipótesis planteadas y la relevancia del constante apego al método científico para resolver las interrogantes planteadas originalmente. Agradezco también sus valiosos comentarios como amigos que me alentaron a concluir esta investigación. El Dr. Stuart Wakeham

(Skidaway Institute of Oceanography, Georgia, EUA) proporcionó ayuda invaluable en su laboratorio para la implementación del método de ácidos grasos sedimentarios. La ayuda de todos ellos y su amable colaboración se agradece grandemente.

El trabajo en equipo desarrollado con el personal y estudiantes de la División de Geoquímica Ambiental, del Instituto de Investigaciones Oceanológicas (UABC), fue una fuente inagotable de apoyo y proporcionó un ambiente altamente creativo y colaborativo durante todo el desarrollo de este trabajo. Se agradece en particular al M.C. Pedro G. Castro, al M.C. Eduardo Ortíz, M.C. Alberto Sánchez, M.C. Fernando Soto, M.C. Jorge Pacheco, M.C. Juan Angel Chavez, M.C. Julio Villaescusa, por su constante disponibilidad y apoyo prestado durante el desarrollo de este trabajo. Muchas gracias amigos.

Se agradece a CONACYT por el apoyo financiero otorgado a varios de los proyectos de mi asesor, Dr. José Carriquiry, durante el transcurso de mis estudios. Los siguientes proyectos apoyaron parcialmente a mi trabajo: (1) proyecto de infraestructura analítica F538-T9309; con el cual se adquirieron los espectrómetros de masas (EMRI, CG-MS), esenciales para la realización de esta investigación; (2) los proyecto de investigación D1433-T9201, que proporcionó apoyo logístico en las salidas de campo para muestreo de sedimentos; el proyecto 2469P-T que proporcionó apoyo con materiales y sustancias de laboratorio; y el proyecto 3929T, del Dr. Víctor Camacho, con el cual se adquirió el cromatógrafo de gases HP con detector de ionización de flama, esencial en el estudio de los ácidos grasos sedimentarios. Se agradece enormemente también al Conacyt el apoyo otorgado a mi persona en forma de una beca de posgrado. Su apoyo fue vital durante el período en el que realizaba mis estudios con un permiso sin goce de sueldo por parte del CICIMAR-IPN.

Se agradece enormemente a la UABC y al Programa de Posgrado en Oceanografía Costera por todo el apoyo y comprensión brindado durante el transcurso de este estudio. Su apoyo a mis gestiones fue crítico en garantizar la culminación de este estudio. Al proyecto UABC 4041, a cargo del Dr. José Carriquiry, que proporcionaron durante todo este tiempo los recursos logísticos, y parcialmente los financieros, para la realización de este estudio. Se agradece al Instituto de Investigaciones Oceanológicas

(UABC), al personal directivo, administrativo y del departamento de dibujo, por la diversidad de apoyos directos e indirectos otorgados a mis actividades de investigación.

Asimismo, es preciso agradecer al Director del CICIMAR, M.C. Víctor Gómez Muñoz por la acreditación y respaldo que tuvo a bien otorgarme ante el Instituto Politécnico Nacional, lo cual fue un factor decisivo. Gracias por creer en la culminación de este trabajo.

A mis compañeros y colegas del CICIMAR-IPN, con afecto al M.C. Lucio Godínez Horta, jefe del Departamento de Oceanología, por su apoyo irrestricto, al Dr. Evgueny Shumilin por sus correcciones, a Paulina A. González G. por su invaluable entusiasmo y confianza. Al C. Dr. Víctor René Magallanes O. por los comentarios durante el la escritura de este trabajo y particularmente al M.C. Mario Grajeda M. por su extenso trabajo de revisión y correcciones a este manuscrito.

Agradezco especialmente al Dr. Juan S. Elorduy Garay, editor de la revista *Oceánides* que publica el CICIMAR por su excelente trabajo de edición en este manuscrito.

Deseo hacer un reconocimiento a las Familias Vargas Castro y Serrano Bañuelos por todos sus ánimos y buena voluntad; asimismo, con gran gratitud a mis padres Roberto Aguíñiga Hernández y Ma. Esthela García Acuña, por todo su respaldo moral. Por último y no por ello menos importante, agradezco a mi esposa Emma Margarita Frías Serrano. No existen palabras que describan mi más eterno agradecimiento por tu incondicional apoyo durante mi doctorado y por todo lo que me has brindado. A mis hijos Sergio Leonardo (León) y Rodrigo Sebastián (Gío), por todo el tiempo que no pude estar con ellos.

Hoy me he sorprendido hablando
Sin el permiso de mis labios.
Repasando mi vocabulario
Se me escapó una palabra que perdí un día de usarla tanto.

Esa palabra es *gracias*,
No la digas, ni la pintes,
Sólo escúchala despacio.

Este trabajo es mi manera
De agradecerlos a todos
La vida recién estrenada
Que me habéis entregado.

A los que estuvisteis
Y a los que esteis...
Espero que os guste.

CONTENIDO

| | Página |
|---|-----------|
| CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... | 2 |
| 1.2. ANTECEDENTES: ÁREA DE ESTUDIO..... | 3 |
| CAPÍTULO 2. MÉTODOS | 7 |
| 2.1. PREPARACIÓN DE MUESTRAS..... | 7 |
| 2.2. ISÓTOPOS ESTABLES DE CARBONO Y NITRÓGENO..... | 8 |
| 2.2.a. <i>Espectrómetro de masas de razones isotópicas</i> | 9 |
| 2.2.b. <i>Determinación de isótopos estables</i> | 10 |
| 2.3. BIOMARCADORES LIPÍDICOS: ÁCIDOS GRASOS..... | 12 |
| 2.3.a. <i>Análisis de ácidos grasos</i> | 13 |
| 2.3.b. <i>Identificación y cuantificación ácidos grasos metilados</i> | 15 |
| 2.3.c. <i>Procesamiento de datos</i> | 17 |
| 2.4. BIOMARCADORES LIPÍDICOS: ÁCIDOS GRASOS DE FOSFOLÍPIDOS..... | 18 |
| 2.4.a. <i>Análisis de ácidos grasos de fosfolípidos</i> | 19 |
| 2.4.b. <i>Métodos interpretativos</i> | 20 |
| CAPITULO 3. COMPOSICION ELEMENTAL DE CARBONO Y NITROGENO | 28 |
| 3.1. TRAZADORES MOLECULARES DE CARBONO Y NITRÓGENO..... | 28 |
| 3.2. RESULTADOS..... | 29 |
| 3.2.a. <i>Análisis factorial en modo Q</i> | 34 |
| 3.2.b. <i>Resultados generales de los grupos</i> | 35 |
| 3.2.c. <i>Análisis factorial en modo R</i> | 37 |
| 3.2.d. <i>Caracterización estadística de las estaciones del grupo 1</i> | 39 |
| 3.2.e. <i>Caracterización estadística de las estaciones del grupo 2</i> | 40 |
| 3.2.f. <i>Caracterización estadística de las estaciones del grupo 3</i> | 41 |
| 3.2.g. <i>Caracterización estadística de las estaciones del grupo 4</i> | 42 |
| 3.3. DISCUSIONES..... | 44 |
| 3.3.a. <i>Isótopos de carbono</i> | 45 |
| 3.3.b. <i>Razones C/N</i> | 49 |
| 3.3.c. <i>Isótopos de nitrógeno</i> | 51 |
| 3.4. CONCLUSIONES..... | 55 |
| CAPÍTULO 4. ÁCIDOS GRASOS EN SEDIMENTOS SUPERFICIALES DEL DELTA DEL RÍO COLORADO | 74 |
| 4.1. ÁCIDOS GRASOS EN MATERIAL ORGÁNICO SEDIMENTARIO..... | 74 |
| 4.2. RESULTADOS..... | 75 |
| 4.2.a. <i>Análisis estadístico multivariado de ácidos grasos</i> | 75 |
| 4.3. DISCUSIÓN..... | 78 |
| 4.3.a. <i>Fuentes de ácidos grasos en el delta del río Colorado</i> | 80 |
| 4.4. CONCLUSIONES..... | 84 |

| | |
|--|------------|
| CAPÍTULO 5. ÁCIDOS GRASOS DE FOSFOLÍPIDOS EN LOS SEDIMENTOS SUPERFICIALES DEL DELTA DEL RÍO COLORADO. | 99 |
| 5.1. ÁCIDOS GRASOS DE FOSFOLÍPIDOS COMO BIOMARCADORES DE ACTIVIDAD HETEROTRÓFICA. | 99 |
| 5.2. RESULTADOS. | 100 |
| 5.2.a. <i>Variación espacial de AG-FOSFO.</i> | 100 |
| 5.2.b. <i>Análisis factorial.</i> | 102 |
| 5.2.c. <i>Prueba de homogeneidad de variancia.</i> | 102 |
| 5.2.d. <i>Análisis de varianza multivariado (ANVAMU).</i> | 103 |
| 5.2.e. <i>Clases de AG-FOSFO.</i> | 104 |
| 5.2.f. <i>AG-FOSFO individuales.</i> | 106 |
| 5.3. DISCUSIÓN. | 110 |
| 5.4. CONCLUSIONES. | 121 |
| 6. CONCLUSIONES. | 140 |
| COSTA DE SONORA. | 141 |
| COSTA DE BAJA CALIFORNIA. | 142 |
| 7. LITERATURA CITADA. | 145 |

LISTA DE FIGURAS

| | PÁGINA |
|---|--------|
| FIGURA 2.1. ESTACIONES DE MUESTREO EN EL DELTA DEL RÍO COLORADO..... | 21 |
| FIGURA 2.2. DIAGRAMA DE FLUJO DE LA METODOLOGÍA GENERAL..... | 22 |
| FIGURA 2.3. DIAGRAMA DE FLUJO DE LA DETERMINACIÓN DE ISÓTOPOS ESTABLES DE C Y N, MODIFICADO DE VERARDO ET AL. (1990)..... | 23 |
| FIGURA 2.4. DIAGRAMA DE FLUJO DE LA DETERMINACIÓN DE ÁCIDOS GRASOS..... | 24 |
| FIGURA 2.5. DIAGRAMA DE LA DETERMINACIÓN DE ÁCIDOS GRASOS DE FOSFOLÍPIDOS..... | 25 |
| FIGURA 2.6. CURVA DE CALIBRACIÓN DE CARBONO USANDO BBOT COMO ESTÁNDAR..... | 26 |
| FIGURA 2.7. CURVA DE CALIBRACIÓN DE NITRÓGENO USANDO BBOT COMO ESTÁNDAR..... | 27 |
| FIGURA 3.1. ESTACIONES DE MUESTREO DE SEDIMENTO SUPERFICIAL PARA DETERMINAR ISÓTOPOS ESTABLES DE CARBONO Y NITRÓGENO EN EL DELTA DEL RÍO COLORADO..... | 57 |
| FIGURA 3.2. ISOLÍNEAS DE $\delta^{13}\text{C}$ EN SEDIMENTOS SUPERFICIALES DEL DELTA DEL RÍO COLORADO. LOS PUNTOS NEGROS INDICAN LAS ESTACIONES MUESTREADAS..... | 58 |
| FIGURA 3.3. ISOLÍNEAS DE $\delta^{15}\text{N}$ EN SEDIMENTOS SUPERFICIALES DEL DELTA DEL RÍO COLORADO. LOS PUNTOS NEGROS INDICAN LAS ESTACIONES MUESTREADAS..... | 59 |
| FIGURA 3.4. ISOLÍNEAS DE RAZONES C/N EN SEDIMENTOS SUPERFICIALES DEL DELTA DEL RÍO COLORADO. LOS PUNTOS NEGROS INDICAN LAS ESTACIONES MUESTREADAS..... | 60 |
| FIGURA 3.5. RELACIÓN DE LAS RAZONES C/N Y VALORES $\delta^{13}\text{C}$ EN SEDIMENTOS SUPERFICIALES DEL DELTA DEL RÍO COLORADO..... | 61 |
| FIGURA 3.6. RELACIÓN DE VALORES $\delta^{13}\text{C}$ Y DISTANCIA (KM) EN SEDIMENTOS SUPERFICIALES DEL DELTA DEL RÍO COLORADO..... | 62 |
| FIGURA 3.7. RELACIÓN DE LAS CARGAS DE LOS FACTORES 1 Y 2 QUE MUESTRA LOS GRUPOS DE ESTACIONES DETERMINADOS POR ANÁLISIS FACTORIAL (MODO Q), EN SEDIMENTOS SUPERFICIALES DEL DELTA DEL RÍO COLORADO..... | 63 |
| FIGURA 3.8. ISOLÍNEAS DE LAS CARGAS DEL FACTOR 1 QUE MUESTRAN LOS AGRUPAMIENTOS DE LAS ESTACIONES EN EL DELTA DEL RÍO COLORADO. LOS PUNTOS NEGROS INDICAN LAS ESTACIONES MUESTREADAS..... | 64 |
| FIGURA 3.9. ISOLÍNEAS DE LAS CARGAS DEL FACTOR 2 QUE MUESTRAN LOS AGRUPAMIENTOS DE LAS ESTACIONES EN EL DELTA DEL RÍO COLORADO. LOS PUNTOS NEGROS INDICAN LAS ESTACIONES MUESTREADAS..... | 65 |
| FIGURA 3.10. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LAS CARGAS DE LOS FACTORES Y SU PORCENTAJE DE VARIABILIDAD PARA EL GRUPO 1..... | 66 |
| FIGURA 3.11. ANÁLISIS DE REGRESIÓN LINEAL DE LAS VARIABLES DEL GRUPO 1..... | 67 |
| FIGURA 3.12. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LAS CARGAS DE LOS FACTORES Y SU PORCENTAJE DE VARIABILIDAD PARA EL GRUPO 2..... | 68 |
| FIGURA 3.13. ANÁLISIS DE REGRESIÓN LINEAL DE LAS VARIABLES DEL GRUPO 2..... | 69 |
| FIGURA 3.14. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LAS CARGAS DE LOS FACTORES Y SU PORCENTAJE DE VARIABILIDAD PARA EL GRUPO 3..... | 70 |
| FIGURA 3.15. ANÁLISIS DE REGRESIÓN LINEAL DE LAS VARIABLES DEL GRUPO 3..... | 71 |
| FIGURA 3.16. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LAS CARGAS DE LOS FACTORES Y SU PORCENTAJE DE VARIABILIDAD PARA EL GRUPO 4..... | 72 |
| FIGURA 3.17. ANÁLISIS DE REGRESIÓN LINEAL DE LAS VARIABLES DEL GRUPO 4..... | 73 |
| FIGURA 4.1. ESTACIONES MUESTREADAS PARA DETERMINAR ÁCIDOS GRASOS EN SEDIMENTOS SUPERFICIALES EN EL DELTA DEL RÍO COLORADO..... | 86 |
| FIGURA 4.2. ISOLÍNEAS DE ÁCIDOS GRASOS NORMALIZADOS POR UNIDAD DE CARBONO ($\mu\text{g AGT/MG C}$) EN SEDIMENTOS SUPERFICIALES DEL DELTA DEL RÍO COLORADO..... | 87 |
| FIGURA 4.3. ISOLÍNEAS DE LA CONCENTRACIÓN DE CARBONO ORGÁNICO TOTAL ($\text{MG C/G SEDIMENTO SECO}$) EN SEDIMENTOS SUPERFICIALES DEL DELTA DEL RÍO COLORADO..... | 88 |

| | |
|---|-----|
| FIGURA 4.4. FUENTES ORGÁNICAS EVALUADAS POR ÁCIDOS GRASOS EN LOS SEDIMENTOS SUPERFICIALES DEL DELTA DEL RÍO COLORADO..... | 89 |
| FIGURA 4.5. ANÁLISIS CANÓNICO DE LAS FUENTES ORGÁNICAS DEFINIDAS POR EL ANÁLISIS DE GRUPO (MODO R)..... | 90 |
| FIGURA 4.6. DENDROGRAMA DE LOS GRUPOS BIOGEOQUÍMICOS (MODO Q) EN LOS SEDIMENTOS DEL DELTA DEL RÍO COLORADO..... | 91 |
| FIGURA 4.7. ZONAS BIOGEOQUÍMICAS, DEFINIDAS POR EL ANÁLISIS DE GRUPOS EN MODO Q, EN LOS SEDIMENTOS DEL DELTA DEL RÍO COLORADO..... | 92 |
| FIGURA 4.8. ANÁLISIS CANÓNICO DE LOS GRUPOS BIOGEOQUÍMICOS DEFINIDOS POR EL ANÁLISIS DE GRUPOS EN MODO Q..... | 93 |
| FIGURA 4.9. DISTRIBUCIÓN DE LOS ÁCIDOS GRASOS EN LOS SEDIMENTOS SUPERFICIALES EN EL DELTA DEL RÍO COLORADO..... | 94 |
| FIGURA 4.10. CONTRIBUCIÓN PORCENTUAL DE LAS FUENTES ORGÁNICAS EN LOS SEDIMENTOS SUPERFICIALES EN EL DELTA DEL RÍO COLORADO..... | 95 |
| FIGURA 5.1. ESTACIONES MUESTREADAS PARA DETERMINAR AG-FOSFO EN SEDIMENTOS SUPERFICIALES DEL DELTA DEL RÍO COLORADO..... | 123 |
| FIGURA 5.2. PORCENTAJES PROMEDIO Y DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE CLASES DE AG-FOSFO EN SEDIMENTOS SUPERFICIALES DEL DELTA DEL RÍO COLORADO..... | 124 |
| FIGURA 5.3. DISTRIBUCIÓN DE LAS RAZONES DE AG-FOSFO EN SEDIMENTOS SUPERFICIALES DEL DELTA DEL RÍO COLORADO..... | 125 |
| FIGURA 5.4. DISTRIBUCIÓN DE AG-FOSFO NORMALIZADOS POR UNIDAD DE CARBONO EN SEDIMENTOS SUPERFICIALES DEL DELTA DEL RÍO COLORADO..... | 126 |
| FIGURA 5.5. DISTRIBUCIÓN DE BIOMASA BACTERIANA CALCULADA A PARTIR DE LOS AG-FOSFO EN SEDIMENTOS SUPERFICIALES DEL DELTA DEL RÍO COLORADO..... | 127 |
| FIGURA 5.6. CARGA DE FACTORES PARA LAS CLASES DE AG-FOSFO (MODO Q)..... | 128 |
| FIGURA 5.7. AGRUPAMIENTO DE LAS ESTACIONES CON BASE EN ISOLÍNEAS DE LAS CARGAS DEL FACTOR 1 EN EL DELTA DEL RÍO COLORADO..... | 129 |
| FIGURA 5.8. AGRUPAMIENTO DE LAS ESTACIONES CON BASE EN ISOLÍNEAS DE LAS CARGAS DEL FACTOR 2 EN EL DELTA DEL RÍO COLORADO..... | 130 |
| FIGURA 5.9. CLASES DE AG-FOSFO DE LOS FACTORES 1 Y 2 (MODO Q) EN LAS ESTACIONES DEL DELTA DEL RÍO COLORADO..... | 131 |
| FIGURA 5.10. PORCENTAJES DE AG-FOSFO INDIVIDUALES PRESENTES EN LAS ESTACIONES AGRUPADAS POR EL FACTOR 1 EN EL DELTA DEL RÍO COLORADO..... | 132 |
| FIGURA 5.11. PORCENTAJES DE AG-FOSFO INDIVIDUALES PRESENTES EN LAS ESTACIONES AGRUPADAS POR EL FACTOR 2 EN EL DELTA DEL RÍO COLORADO..... | 133 |

LISTA DE TABLAS

| | Página |
|---|--------|
| TABLA 3.1. VALORES ISOTÓPICOS Y COMPOSICIÓN ELEMENTAL DE CARBONO Y NITRÓGENO EN SEDIMENTOS SUPERFICIALES DEL DELTA DEL RÍO COLORADO. | 33 |
| TABLA 3.2. VALORES ESTADÍSTICOS DEL PROMEDIO Y DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE LAS VARIABLES PARA CADA UNO DE LOS GRUPOS OBTENIDOS DEL ANÁLISIS FACTORIAL..... | 34 |
| TABLA 3.3. MATRIZ VARIMAX DE LOS FACTORES, COMUNALIDADES DE CADA VARIABLE Y VARIANCIAS DE LOS TRES FACTORES EN LOS SEDIMENTOS SUPERFICIALES EN EL DELTA DEL RÍO COLORADO..... | 38 |
| TABLA 4.1. ÁCIDOS GRASOS Y CARBONO ORGÁNICO TOTAL EN LOS SEDIMENTOS SUPERFICIALES EN EL DELTA DEL RÍO COLORADO. | 96 |
| TABLA 4.2. PORCENTAJES DE ÁCIDOS GRASOS EN EL DELTA DEL RÍO COLORADO..... | 97 |
| TABLA 4.3. ANÁLISIS DISCRIMINANTE PARA LAS FUENTES ORGÁNICAS DEFINIDAS POR EL ANÁLISIS DE GRUPOS (MODO R)..... | 98 |
| TABLA 4.4. ANÁLISIS CANÓNICO PARA LAS FUENTES ORGÁNICAS DEFINIDAS POR EL ANÁLISIS DE GRUPOS (MODO R)..... | 98 |
| TABLA 5.1. PORCENTAJES DE ÁCIDOS GRASOS DE FOSFOLÍPIDOS EN SEDIMENTOS SUPERFICIALES DEL DELTA DEL RÍO COLORADO. | 134 |
| TABLA 5.2. CARGA Y VARIANCIAS DE LOS FACTORES EN LOS SEDIMENTOS SUPERFICIALES DEL DELTA DEL RÍO COLORADO. | 135 |
| TABLA 5.3. PRUEBA DE HOMOGENEIDAD DE VARIANZA PARA LOS FACTORES 1 Y 2, ($\alpha = 0.05$)..... | 136 |
| TABLA 5.4. PRUEBA DE ANVAMU DE WILKS Y R DE RAO PARA LOS FACTORES 1 Y 2, ($\alpha = 0.05$)..... | 137 |
| TABLA 5.5. PRUEBA "HONESTA" DE TUKEY PARA LOS FACTORES 1 Y 2, ($\alpha = 0.05$)..... | 138 |
| TABLA 5.6. PORCENTAJES DE LAS CLASES DE AG-FOSFO DE LOS FACTORES 1 Y 2 EN SEDIMENTOS SUPERFICIALES DEL DELTA DEL RÍO COLORADO. | 139 |

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.

En medios ambientes modernos la transferencia al océano de materia orgánica de origen terrestre constituye la vía de preservación del carbono más importante, por lo que caracterizar la composición de la materia orgánica sedimentaria en ecosistemas costeros resulta fundamental en el estudio del ciclo global del carbono (Hedges, 1992).

La materia orgánica particulada tiene una gran importancia dentro de los ciclos biogeoquímicos (Hedges, 1992; Hedges y Prahl, 1993; Lee y Wakeham, 1992; Peterson *et al.*, 1994), ya que controla la redistribución de elementos bioactivos en el océano (Wakeham *et al.*, 1997), los sitios de regeneración de nutrientes (Colombo *et al.*, 1996) y la transferencia energética a otros niveles tróficos (Azam *et al.*, 1983). El entendimiento de éstos procesos, responsables de la transformación de la materia orgánica aún representa un reto en los estudios de la biogeoquímica marina (Canuel y Martens, 1993; Wakeham y Lee, 1993; Sun *et al.*, 1997).

La matriz en la que se encuentra la materia orgánica afecta directamente su reactividad (Cowie y Hedges, 1992), por lo que los compuestos bioquímicos que la componen pueden estar afectados de manera diferente por los mismos procesos (Colombo *et al.*, 1996) y el patrón de reactividad no es predecible en forma consistente (Wakeham *et al.*, 1997). La matriz orgánica sedimentaria es un reservorio natural donde es posible identificar fuentes, flujos, reactividad y diagénesis temprana de la materia orgánica (Farrington, 1992).

En este estudio se aplicó una perspectiva de determinación múltiple de isótopos estables, composición elemental y biomarcadores lipídicos para evaluar la composición orgánica en la matriz sedimentaria del delta del río Colorado y determinar fuentes y

patrones de intercambio de material orgánico en esta zona. La variación espacial de las variables geoquímicas determinadas permitió estimar los procesos de mezcla de las principales fuentes orgánicas y los posibles procesos diagenéticos que determinan la composición y distribución de la materia orgánica de este ecosistema.

1.1. Planteamiento del problema.

La zona del delta del río Colorado constituye el núcleo de la Reserva de la Biosfera del Delta del Río Colorado y Alto Golfo de California. Esta área presenta cambios provocados por las variaciones del aporte de agua del río Colorado, por lo que existe el interés de establecer procedimientos y normas de manejo de la zona (Álvarez-Borrego, 1983).

Para un mejor entendimiento del ciclo biogeoquímico del carbono en el delta del río Colorado es necesario determinar las principales fuentes orgánicas en el ecosistema y evaluar sus procesos de mezcla y transformación que hacen variar la composición orgánica sedimentaria en el espacio y en el tiempo. Dentro de este contexto, es particularmente importante considerar los efectos de la eliminación de aportes de agua, sedimentos y material orgánico terrígeno lábil del río Colorado. La influencia de las corrientes de marea debe estar resuspendiendo materia orgánica de origen terrestre depositada por el río en tiempos pasados.

La materia orgánica que proviene del depósito deltáico pudiera ser de naturaleza más refractaria y entra al ecosistema mezclándose con el material detrítico derivado de los pastizales adyacentes y los aportes orgánicos fitoplanctónicos y heterótrofos. Lo anterior da lugar a la existencia de un gran reservorio de materia orgánica que define la base energética sobre la cual pudiera descansar la trama trófica de este ecosistema. Conocer y

caracterizar éste material orgánico es esencial para el entendimiento de cómo es asimilado y reciclado el carbono orgánico dentro de un ecosistema (Peterson *et al.*, 1985; Peterson y Fry, 1987; Peterson *et al.*, 1994).

Es posible que el tipo de material orgánico que introducen y transportan las corrientes de mareas determine la variabilidad de la composición de la materia orgánica en el registro sedimentario. Si consideramos que la composición orgánica determina su reactividad (Colombo *et al.*, 1996) cabe suponer que los procesos de resuspensión y depositación en el delta (Carriquiry *et al.*, 1992 a, b) afectarán de manera diferente al material orgánico terrígeno y al marino.

La composición de la materia orgánica que se produce por producción primaria y la que se altera por degradación heterotrófica dependería del substrato y matriz orgánicos, del origen de los nutrientes y de los mecanismos de transporte de materiales definidos por el patrón hidrodinámico dominante. Para entender la variabilidad de los procesos biológicos y fisicoquímicos que se reflejan en el material sedimentario en el delta, se evaluó la distribución espacial de $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$, ácidos grasos totales y ácidos grasos de fosfolípidos en la matriz sedimentaria. Se discuten las fuentes orgánicas que se introducen, producen y transporta dentro del delta del río Colorado.

1.2. Antecedentes: Área de estudio.

La Reserva de la Biosfera del Delta del Río Colorado es un área que se localiza entre los 31°02' y los 31°53' N y los 114° 32' y 114° 55' W, entre los estados de Sonora al Este y de Baja California al Oeste, y que comprende la cuenca del estuario del río Colorado (Lepley *et al.*, 1975). Desde el último período glacial (140,000 años) se ha depositado gran cantidad de sedimento en las partes bajas de la cuenca formando el delta

del río Colorado (Thompson, 1979). La depositación de sedimento regulada por el río Colorado formó un cono de aproximadamente 500 km² de sedimentos que surtía hasta 150 millones de toneladas de lodo y arena al año en la zona del delta (Meckel, 1975).

El clima del área es árido continental, con escasa precipitación pluvial y baja humedad. La precipitación promedio anual es de sólo 68 mm (Miranda *et al.*, 1990). La tasa de evaporación en el norte del Golfo de California es del orden de 100 cm/año (Lavín y Organista, 1988; Castro *et al.*, 1994) pero llega a ser hasta de 250 cm/año en la región del delta (Thompson, 1975).

La descarga de agua y sedimentos del río Colorado disminuyó con la construcción de las presas Hoover (1935) y Glenn Canyon (1955). A partir de 1960, la descarga del río Colorado se ha reducido en más de tres órdenes de magnitud, hasta llegar a 0.1 x 10⁶ Ton/año (Milliman y Meade, 1983), causando cambios drásticos en la hidrodinámica y en el ambiente del sistema estuarino (Álvarez-Borrego, 1983; Baba *et al.*, 1991 a, b). Existe, además, un canal que conduce las aguas residuales del valle Wellton Mohawk, USA, a una laguna de oxidación cerca de la desembocadura del río Colorado, aunque no llega efectivamente a descargar en el cauce del río (González-Casillas, 1991).

Actualmente la cuota de agua que México recibe por los tratados binacionales con USA es utilizada totalmente para fines domésticos y agrícolas del valle de Mexicali. De tal manera que, en el presente, no llega agua dulce superficial al final del río excepto por eventuales descargas de emergencia de las presas, ocasionado por eventos climatológicos extraordinarios.

En el área del delta los canales están separados por barras de sedimento que emergen como islas (Meckel, 1975), como la isla Montague (47 Km²) y la isla Pelicano (8 km²). Estas islas son bajas y planas y llegan a ser cubiertas por el agua durante las mareas

vivas de julio-agosto que son del orden de 9 m (Matthews, 1969). Estos intervalos de mareas producen intensas corrientes, hasta de 3 m/seg en la zona de los canales, las cuales importan seston por la costa de Sonora y lo exportan por la costa de Baja California (Cupúl-Magaña, 1994). La influencia de la marea llega hasta 40 km río arriba donde el 95% de su vertiente presenta marismas cubiertas por pastos marinos (*Distichlis palmeri*) especialmente de la mitad hacia el norte de la isla Montague (Carrquiry y Sánchez, 1999).

Carrquiry y Sánchez (1999) encontraron, en el Alto Golfo de California, un gradiente textural en dirección NE-SW, caracterizado por sedimentos más finos ($\sim 6 \phi$) y pobremente clasificados en la costa de Baja California, con respecto a la costa de Sonora ($\sim 3 \phi$). Estos autores infirieron que el transporte de sedimentos mantiene un patrón contrario a las manecillas del reloj, lo que es consistente con las estimaciones hechas por Álvarez-Borrego y Galindo-Bect (1974) a partir de datos de sensores remotos y de datos de nutrientes.

Álvarez-Sánchez (com. pers.) ha estimado que la excursión de la marea es de 10 km con una orientación NE-SW. Asimismo, encontró que las magnitudes de las velocidades de corriente residual son mayores (~ 4 cm/seg) por la costa de Sonora. Existe una intrusión de agua oceánica por la costa de Sonora que gira hacia el oeste a la altura del Golfo de Santa Clara disminuyendo su velocidad de corriente residual (~ 2 cm/seg); luego se bifurca, en la parte sur de la isla Montague a la altura de Punta Sargento (Figura 1.1), en un flujo que sigue hacia el sur y otro que sigue la costa de Baja California; entre estos dos flujos se genera una zona de muy baja velocidad residual (< 1 cm/seg). Así pues, el efecto de las corrientes de marea en el delta debe tener un efecto determinante en la distribución del sedimento y materia orgánica.

El delta del río Colorado sigue un patrón antiestuarino que corresponde a una laguna costera con salinidades de hasta 40‰ y valores máximos de nutrientes de 15 μM (NO_2), 53 μM (NO_3), 11.5 μM (PO_4), y 92 μM (SiO_2) que indican aportes de agua intersticial, así como resuspensión de sedimentos provocada por las mareas (Hernández-Ayón *et al.*, 1992).

Carriquiry *et al.* (1992 a, b) y Zamora-Casas (1993) han reportado que el material particulado del delta está sujeto a un ciclo de erosión-dilución-sedimentación de carácter semidiurno, con valores promedio de seston de 1.5 gr/l, del que el 8% corresponde a material orgánico. Cupul y Carriquiry (1992) establecieron que la asimetría entre el flujo y el reflujó es provocada por la fricción de la onda de marea con el fondo y bordes del estuario. Este exporta sedimento en suspensión, PO_4 y NO_3 que están en equilibrio con los flujos de nitritos y silicatos.

La resuspensión de sedimentos en la zona del delta produce gran turbidez. Se han observado valores de coeficiente de extinción de la luz, tan bajos como -0.05 m^{-1} y una carga sedimentaria con máximos de 8 g/l (Zamora-Casas, 1993). A pesar de estas condiciones se han reportado valores de clorofila de 5 mg/m^3 y máximos de productividad primaria de 76 $\text{mg C}/\text{m}^3/\text{hora}$ (Santamaría-del-Ángel *et al.*, 1996). Esta alta productividad puede obedecer a mecanismos de fotoadaptación del fitoplancton que capta la energía solar eficientemente durante los breves instantes que los procesos turbulentos lo llevan hasta la superficie (Santamaría-del-Ángel *et al.*, 1996). Asimismo, se han encontrado biomasas bacterianas de 240 $\text{mg C}/\text{m}^3$, y tasas de crecimiento bacteriano extremadamente altas, lo que ha permitido definir este ecosistema como heterotrófico (Orozco-Borbón, 1995).

CAPÍTULO 2. MÉTODOS.

2.1. Preparación de muestras.

Para evaluar la variación isotópica, elemental y de biomarcadores lipídicos en la matriz orgánica sedimentaria en el delta del río Colorado se colectaron 35 muestras de sedimento superficial con una draga Van Veen durante julio de 1995 (Figura 2.1). Se colectó sólo el primer centímetro del sedimento superficial y se almacenó en bolsas de plástico. El sedimento se mantuvo a 4°C hasta su traslado al laboratorio donde se almacenó a -10°C para luego liofilizarse y almacenarse a -60 °C hasta su análisis. El diagrama de flujo general de la metodología se describe en la figura 2.2.

El sedimento liofilizado se homogeneizó y se tomaron:

a) Una submuestra de 2 g para la determinación de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$. El protocolo de preparación de la muestra y determinación analítica se describe en la figura 2.3.

b) Una submuestra de 30 g de sedimento para la obtención del extracto lipídico total (ELT). El protocolo de preparación de la muestra y determinación analítica de los ácidos grasos de la matriz orgánica sedimentaria total se describe en la figura 2.4.

c) Una alícuota de 1 ml del extracto lipídico total se utilizó para la determinación de los ácidos grasos de fosfolípidos. El protocolo de preparación de la muestra y determinación analítica se describe en la figura. 2.5.

2.2. Isótopos estables de carbono y nitrógeno.

El 98.89% de todo el carbono en la naturaleza es ^{12}C y el 1.11% es ^{13}C . El nitrógeno presenta dos isótopos estables ^{14}N (99.64%) y ^{15}N (0.36%) (Wada y Hattory, 1990; Coleman y Fry, 1993). Se ha adoptado la notación δ para expresar las diferencias relativas de las razones de isótopos entre las muestras y los estándares. Los valores $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ se calculan a partir de las razones medidas en la muestra y la de los elementos estándares usando la expresión:

$$\delta^{13}\text{C} (\text{‰}) = [(R_{\text{muestra}} - R_{\text{estándar}}) / R_{\text{estándar}}] \times 10^3$$

donde $\delta^{13}\text{C}$ es la diferencia expresada en partes por mil (‰), entre el contenido de ^{13}C de la muestra y del estándar; y R es la razón 45/44 de la muestra o gas estándar. Análogamente para la determinación de $\delta^{15}\text{N}$, R es la razón 29/28 de la muestra o gas estándar.

Por convención internacional, el $\delta^{13}\text{C}$ se expresa en referencia a un estándar de carbonato de calcio conocido como PDB (Pee Dee Belemnita) que es una calcita fósil de la formación del Cretáceo Pee Dee en Carolina de Sur (USA). Se le ha asignado un valor de 0‰ al estándar PDB y el signo del valor $\delta^{13}\text{C}$ indica si la muestra tiene un valor más alto ó más bajo que la razón $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ del PDB. La referencia isotópica que se usa como estándar en el caso del nitrógeno es el N_2 ultrapuro y tiene un valor de 0‰.

Para hacer una medición de razones isotópicas, el carbono contenido en una muestra debe ser transformado a CO_2 por un método tal que no cause fraccionamiento isotópico en la misma y que permita hacer mediciones cuantitativas del contenido de

carbono. Es necesario eliminar el carbono de los carbonatos, que generalmente está más enriquecido con ^{13}C que el carbono orgánico. En este estudio no se consideró utilizar fracciones bioquímicas específicas para el análisis isotópico, por lo que se analizó la matriz orgánica sedimentaria total.

2.2.a. Espectrómetro de masas de razones isotópicas.

Los instrumentos analíticos que se usaron en este trabajo incluyen un analizador de carbono y nitrógeno NA-1500 CARLO ERBA Series 2, acoplado en flujo continuo a un espectrómetro de masas de razones isotópicas VG OPTIMA (FISONS-MICROMASS).

El funcionamiento de este sistema involucra una columna de combustión, donde se oxida completamente toda la materia orgánica. Los productos de combustión de la muestra son acarreados por un flujo constante de helio que pasa a través del catalizador, que inhibe la formación de óxidos de nitrógeno y retiene sustancias que se generan durante la combustión de compuestos halogenados.

La mezcla de los productos de combustión: CO_2 , N, NO y H_2O , pasan a través de una segunda columna que se conoce como columna de reducción. En ésta, los óxidos de nitrógeno son reducidos a nitrógeno elemental el cual, junto con el CO_2 y H_2O , pasa a través de una columna que absorbe agua.

La muestra gaseosa compuesta de nitrógeno elemental y dióxido de carbono es transportada por el Helio y entra a una columna cromatográfica que separa las dos especies químicas. El N_2 , por su bajo peso molecular, eluye antes en la separación cromatográfica. Este gas pasa a través de un detector de termoconductividad que tiene una precisión de

0.1%. En este estudio se utilizó el detector de razones isotópicas para evaluar la composición elemental. Este detector tiene una precisión de 0.05%.

La muestra gaseosa pasa, a través de una interfase, al espectrómetro de masas de razones isotópicas, donde las moléculas son ionizadas, formadas en un haz, aceleradas por un campo eléctrico, desviadas en un campo magnético y, finalmente, detectadas.

2.2.b. Determinación de isótopos estables.

La remoción de carbonatos de las muestras de sedimento se realizó según variaciones a los métodos de Verardo *et al.* (1990), Coleman y Fry (1993) y Yamamuro y Kayanne (1995). Básicamente, se secó la muestra, se homogeneizó, se tomó una submuestra de un gramo, se agregó ácido sulfuroso al 8% y se secó a 50°C. El proceso se repitió hasta que la adición de ácido no produjera efervescencia. Se homogeneizó de nuevo el sedimento y se pesaron 100 mg de sedimento seco en navcillas de estaño taradas, usando una balanza analítica SARTORIUS con una precisión de 0.001 mg.

Para medir simultáneamente las señales de carbono y nitrógeno de una misma muestra, dentro del intervalo de respuesta lineal, se diluyeron las muestras en un factor 1/15, utilizando para ello el VG ISOCHROM DILUTER. Para asegurar la precisión del dato generado, se evaluó rutinariamente la estabilidad y linealidad del sistema antes de cada lote de muestras mediante el uso de un gas FISIONS CO₂ con un $\delta^{13}\text{C}(\text{‰})_{\text{PDB}} = -43.85$ y $\delta^{18}\text{O}(\text{‰})_{\text{PDB}} = -0.32$; y gas N₂ con un $\delta^{15}\text{N}(\text{‰}) = -0.21$. Durante los análisis de rutina se utilizaron gases de referencia ultrapuros de la compañía comercial Air Products (CO₂ grado SFC 99.997% y N₂ grado UHP 99.999%) que fueron intercalibrados con los estándares primarios NIST; cada vez que se cambiaron los gases Air Products se repitió

esta intercalibración. La pureza del gas Helio, utilizado como gas de acarreo, fue de 99.999% (UHP, Air Products).

Los estándares primarios certificados (NIST) que se usaron durante las corridas de las muestras, fueron los siguientes: para nitrógeno se utilizó el estándar IAEA-N₂ (Sulfato de Amonio) cuyo $\delta^{15}\text{N} = +20.3\text{‰}$; para carbono se utilizó un aceite NBS22-OIL cuyo $\delta^{13}\text{C} = -29.7\text{‰}$. De manera rutinaria se trabajó con estándares secundarios a manera de estándares isotópicos internos: BBOT ($\delta^{13}\text{C} = -26.55 \pm 0.14\text{‰}$; $\delta^{15}\text{N} = 21.27 \pm 0.11\text{‰}$) y UREA ($\delta^{13}\text{C} = -48.77 \pm 0.45\text{‰}$; $\delta^{15}\text{N} = -0.77 \pm 0.09\text{‰}$).

Usando el estándar NBS22-OIL con $n=6$ se obtuvo una media de $\delta^{13}\text{C} = -29.75 \pm 0.03\text{‰}$ y con el estándar IAEA-N₂ con $n=3$ se obtuvo una media de $\delta^{15}\text{N} = 20.23 \pm 0.17\text{‰}$. Para la curva de calibración de la composición elemental de carbono y nitrógeno se utilizó como estándar de trabajo el BBOT (2,5-Bis-(5-tert.butyl-benzoxazol-2-yl-thiopen)) cuya composición elemental es: C= 72.53%, N=6.51%, H=6.09%, O=7.43%, S=7.44%. El criterio para elegir el estándar BBOT fue su elevada razón C/N (= 11.14), ya que en pruebas preliminares se encontró que los sedimentos en estudio tenían altas concentraciones de carbono y relativamente bajas de nitrógeno.

Para la curva de calibración del carbono elemental se obtuvo un intervalo de respuesta lineal de 1×10^{-7} a 6×10^{-7} conteos de área con una $r^2 = 0.998$ (Figura 2.5). Para la curva de calibración del nitrógeno elemental se obtuvo un intervalo de respuesta lineal de 2.3×10^{-9} a 2.5×10^{-9} conteos de área con una $r^2 = 0.99$. Se obtuvo una alta sensibilidad ó $1/m = 0.13 \pm 0.002$ (Figura 2.6) demostrando la linealidad de respuesta durante el período de análisis. Las muestras orgánicas de los “miembros terminales” colectados en el área de

estudio tuvieron una precisión que varió de ± 0.03 a $\pm 0.14\%$ para el $\delta^{13}\text{C}$ y de ± 0.05 a $\pm 0.23\%$ para el $\delta^{15}\text{N}$.

2.3. Biomarcadores Lipídicos: Ácidos Grasos.

Los biomarcadores son moléculas orgánicas que indican el origen de la materia orgánica sedimentaria, ya que se pueden asociar a sus compuestos precursores biológicos, pues sus esqueletos básicos se preservan de forma reconocible durante la diagénesis (Killops y Killops, 1993). Los estudios biogeoquímicos pueden estar apoyados en moléculas orgánicas específicas o clases de compuestos orgánicos que posean características estructurales indicadoras de su origen (Volkman *et al.*, 1980, 1981, 1989; Wakeham *et al.*, 1984; Wakeham y Volkman, 1991).

Por sus características de estabilidad y significación en los procesos metabólicos, los ácidos grasos pueden ser utilizados en estudios de fuentes de materia orgánica a la zona costera, permitiéndonos distinguir entre el material orgánico proveniente de plantas terrestres (alóctono) y aquel proveniente de fitoplancton y bacterias (autóctono) (Cranwell, 1982). Los lípidos comprenden entre 5 y 20% del carbono orgánico particulado proveniente del fitoplancton (Parson *et al.*, 1984) y existen abundantemente en sedimentos recientes (Farrington *et al.*, 1977; Cranwell, 1982; Volkman *et al.*, 1983).

Los ácidos grasos son ácidos carboxílicos de cadena larga cuya fórmula general es: $\text{C}_n\text{H}_m\text{-COOH}$, en donde C_nH_m es la cadena hidrocarbonada ligada al grupo carboxílico. Estos ocurren en la naturaleza principalmente en forma "ligada", mientras que una minoría ocurre en forma libre (Killops y Killops, 1993).

2.3.a. Análisis de ácidos grasos.

El análisis de los ácidos grasos totales se realizó según el método de Wakeham y Beier (1991) con algunas modificaciones. El método consta de 5 etapas: extracción, saponificación, derivación, purificación e identificación, y cuantificación. El diagrama de flujo de la metodología general se describe en la figura 2.4.

Para la extracción de los lípidos totales, se colocaron 30 g de sedimento homogeneizado en un sistema Soxhlet y se extrajo en reflujo durante 12 horas con una mezcla de diclorometano:metanol (1.8:1 v/v). El extracto se transfirió a un embudo de separación con NaCl al 5% y se obtuvieron dos fases. La fase del diclorometano se concentró en un rotavapor y se dejó en Na_2SO_3 anhidro durante 12 horas. Este extracto lipídico total (ELT) en diclorometano se transfirió a un vial de 4 ml y se almacenó a 4 °C.

Para saponificar el extracto lipídico total, se transfirió una alícuota del ELT a un tubo de ensaye, se adicionó el estándar de recuperación metilnonadecanoato (C19) y se llevó a sequedad bajo una corriente de N_2 . Enseguida se agregaron 2 ml de hidróxido de potasio en metanol y 2 ml de H_2O . La mezcla se colocó en un bloque de calentamiento a 110°C durante 2 horas para efectuar la reacción de saponificación.

Los lípidos neutros se extrajeron agregando 2 ml de hexano a la mezcla saponificada, agitando durante tres minutos y centrifugando a 1500 r.p.m. por 5 minutos; la fase de hexano se transfirió a otro tubo, repitiendo la extracción tres veces. Los lípidos ácidos se extrajeron agregando HCl (6N) y 2 ml de hexano, agitando por tres minutos y centrifugando a 1500 r.p.m. durante 5 minutos; la fase de hexano se transfirió a un tubo de ensaye, repitiendo la operación tres veces. Los tubos con los extractos neutros y ácidos se dejaron reposar en Na_2SO_3 anhidro durante 12 horas.

El extracto de los lípidos ácidos se secó bajo una corriente de N_2 y se agregaron 400 μ l de tricloruro de boro en metanol (BCl_3/CH_3OH). El tubo de ensaye se purgó con N_2 y se calentó a $100^\circ C$ durante 6 minutos. Después de enfriar el tubo, se le agregaron 2 ml de metanol, 2 ml de H_2O y 2 ml de hexano. El extracto se mezcló por tres minutos y luego se centrifugó a 1500 r.p.m. durante 5 minutos. La fase de hexano se transfirió a un tubo de ensaye, repitiendo la extracción dos veces más. El extracto que contiene los ácidos grasos metilados se dejó reposar en Na_2SO_3 anhidro y se dejó reposar durante 12 horas.

Para la purificación de los ácidos grasos metilados, el extracto obtenido se concentró evaporando bajo una corriente de N_2 . La separación de los ácidos grasos metilados se realizó en una columna cromatográfica empacada con sílica gel (S/P 60A) totalmente activada. Se colectaron siete fracciones con diferentes mezclas de solventes: 1) 7.5 ml de hexano; 2) 5 ml de 25% de tolueno en hexano; 3) 5 ml de 50% de tolueno en hexano; 4) 5 ml de 5% de etilacetato en hexano; 5) 5 ml de 10% de etilacetato en hexano, 6) 5 ml de 15% de etilacetato en hexano y 7) 5 ml de 20% de etilacetato en hexano. Las fracciones 5 y 6 contienen los ácidos grasos metilados. El solvente del tubo se sustituyó por hexano, se llevó casi a sequedad y se transfirió a un vial de 2 ml, al que se le agregó el estándar interno (etil-éster de ácido araquidónico) y se llevó a un volumen conocido para la cuantificación.

2.3.b. Identificación y cuantificación ácidos grasos metilados.

Los ácidos grasos metilados fueron analizados con un cromatógrafo de gases (CG) Hewlett Packard 5890 Serie II, con un detector de ionización de flama (DIF), conectado a un integrador Perkin Elmer PE NELSON modelo 1020 LC (plus).

La separación cromatográfica se realizó con una columna capilar de 30 m x 0.32 mm HP-5 (Hewlett Packard) utilizando hidrógeno como gas de acarreo. Las condiciones de operación fueron: temperatura del detector 310°C; temperatura del inyector 250°C. El programa de temperatura inició a 100°C durante 2 minutos, con un incremento de 3.5°C por minuto hasta alcanzar 300° y permaneciendo 15 minutos a dicha temperatura.

Para la confirmación de la identidad de los ácidos grasos metilados algunas muestras fueron analizadas con un cromatógrafo de gases acoplado a un detector selectivo de masas (CG-DSM) Hewlett Packard 5972-A. Se utilizó el mismo tipo de columna que para el CG y se utilizó Helio como gas transportador. Las condiciones de operación fueron: rango de masas 50-550 unidades de masa atómica con un ciclo de 1.5 s; energía de ionización de 70 eV y un programa de temperatura para el CG de 100-285°C a 3.5°C por minuto.

Para la cuantificación de los ácidos grasos metilados se utilizó el método del estándar interno, utilizando el factor de respuesta del ácido araquidónico como referencia (Wakeham y Beier, 1991). Se trabajó bajo la suposición de que todos los analitos tienen el mismo factor de respuesta. Los cromatogramas fueron procesados en un integrador Perkin Elmer PE NELSON 1020. La identificación de cada uno de los ácidos grasos metilados se realizó, en algunos casos, con estándares puros inyectados en el CG y CG-DSM y

utilizando los fragmentogramas de los compuestos que aparecen como referencia en el programa que opera el HP-NBS75K del CG-DSM. Otros más fueron asignados según los espectros obtenidos en el Instituto de Oceanografía de Skidaway, en Savannah, Georgia, USA.

Las concentraciones de los ácidos grasos fueron calculadas sobre la base del área de cada señal en el cromatograma, del compuesto identificado y referidos al estándar interno. Las concentraciones se refirieron en unidades de ng/g de peso seco y se calcularon con la ecuación:

$$[AG] = \frac{[(S.I.) \cdot (V_{spk}/V_f) \cdot (1/V_i) \cdot (1/A_{s,i})] \cdot V_f \cdot (V_{ELT}/V_A)}{P.S.}$$

AG = Concentración del ácido graso de interés en ng/g

S.I. = Concentración del estándar interno en ng/μl

V_{spk} = Volumen de la alícuota del estándar interno

V_f = Volumen final del vial

V_i = Volumen de inyección

$A_{s,i}$ = Área del estándar interno

V_{ELT} = Volumen del Extracto Lipídico Total

V_A = Volumen del Extracto Lipídico Total analizado

P.S. = Peso seco del sedimento

2.3.c. Procesamiento de datos.

El análisis de datos se realizó con métodos estadísticos que permitieron realizar una comparación multivariada a partir de una matriz de 16 estaciones y 37 ácidos grasos (AG). Los métodos utilizados fueron: análisis de grupos, discriminante y canónico. El análisis de grupos, modo R y modo Q, tiene como objeto agrupar los AG y las estaciones, respectivamente, en orden jerárquico en un dendrograma. Para ambos análisis se determinó la matriz de los coeficientes de similitud de los AG y las estaciones utilizando el coeficiente de correlación de Pearson "r" y para el agrupamiento jerárquico los promedios ponderados de grupo (Davis, 1986). Se realizó el análisis discriminante con la finalidad de validar la separación de los grupos definidos por el análisis anterior en sus dos modalidades. Para probar la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre los grupos obtenidos, se planteó la hipótesis de que las medias multivariadas, tanto de los AG como de las estaciones, son diferentes. Las distancias entre ellos fueron calculadas a partir de las distancias de Mahalanobi. Para probar las diferencias entre las distancias de los grupos se obtuvo una F de Snedecor a un nivel de significación de 0.05. Simultáneamente se obtuvieron las funciones canónicas discriminantes para ver si las variables (AG y estaciones) variaban significativamente (Davis, 1986).

2.4. Biomarcadores lipídicos: Ácidos grasos de fosfolípidos.

Los biomarcadores lipídicos son influenciados por los procesos de transformación (Henrichs, 1992; Santos *et al.*, 1994) y preservación (Hedges, 1992; Killops y Killops, 1993) que frecuentemente involucran actividad heterotrófica. En las muestras naturales existe un gran número de moléculas que permiten la resolución de las fuentes orgánicas, proporcionando información ambiental o diagenética adicional (Hedges y Prahl, 1993; Parkers, 1987; Reemtsma *et al.*, 1990).

Los ácidos grasos de fosfolípidos, que están ligados a la fracción lipídica polar, han demostrado que proporcionan estimaciones de biomasa casi idénticas a las que se hacen con conteos directos de bacterias al microscopio (Balkwill *et al.*, 1988), estimación de actividades enzimáticas, ATP total y actividad respiratoria (White, 1993). La importancia de esto radica en que es posible separar en una matriz orgánica las contribuciones de eucariontes y procariontes (Findlay y Dobbs, 1993) o determinar biomasa microbiana y su estructura comunitaria en sedimentos (Baird *et al.*, 1985; Rajendran *et al.*, 1992).

El uso de los ácidos grasos de fosfolípidos para evaluar cuantitativamente la estructura de la comunidad bacteriana ha sido ampliamente reconocido por estudios selectivos utilizando inhibidores, luz, cambios nutricionales y pastoreo por depredadores (Baird *et al.*, 1985; Ringelberg, 1988). Además, determinando la razón de ácidos grasos *cis* y *trans*, es posible conocer el estado metabólico de los microorganismos (Guckert *et al.*, 1986).

2.4.a. Análisis de ácidos grasos de fosfolípidos.

Para la obtención de ácidos grasos de fosfolípidos se realizó un fraccionamiento del extracto lipídico total. Se llevó a sequedad una alícuota de 1 ml del ELT y se resuspendió en cloroformo. Para realizar el fraccionamiento del ELT se utilizaron columnas de 125 mm x 6 mm empacada con sílica gel (S/P 60A) activada. Las fracciones con las diferentes clases de lípidos se obtuvieron eluyendo consecutivamente 5 ml de acetona, cloroformo y metanol. La fracción eluida con metanol contiene los fosfolípidos. Para proceder a la metilación del extracto, éste se rotaevaporó y se secó bajo una corriente de N₂, para después ser almacenado a 4 °C. Para metilar los ácidos grasos de la fracción de fosfolípidos, al extracto seco obtenido se agregaron 1 ml de tolueno:metanol (1:1, v/v) y 1 ml de hidróxido de potasio disuelto en metanol. La mezcla se agitó por 30 segundos y se incubó a 37 °C, dejándose enfriar a temperatura ambiente. Se agregaron 2 ml de mezcla hexano:cloroformo (4:1, v/v). La mezcla se agitó por 2 minutos y se llevó a pH 7 con aproximadamente 200 µl de ácido acético 1N, verificando con papel pH. Para detener la reacción, se agregaron 2 ml de agua nanopura. La mezcla se agitó durante 30 segundos y luego se centrifugó durante 5 minutos a 2000 r.p.m. Se extrajo la fase orgánica por tres veces. El extracto orgánico se llevó a sequedad para luego ser transferido cuantitativamente usando cloroformo. El extracto seco se almacenó bajo una atmósfera de N₂ a -20 °C hasta que se analizó en el cromatógrafo de gases. La identificación y cuantificación de los ácidos grasos de metilados de los fosfolípidos es el mismo que el descrito en la sección 2.3.b. (Identificación y cuantificación de los ácidos grasos metilados).

2.4.b. Métodos interpretativos.

En este estudio se identificaron 37 ácidos grasos de fosfolípidos (AG-FOSFO) en 10 muestras de sedimento superficial del delta del río Colorado. Con estos resultados se formó una matriz de datos y los AG-FOSFO se clasificaron en seis grupos de biomarcadores: saturados >20 carbonos, saturados pares <20 carbonos, saturados impares <20 carbonos, ramificados, monoinsaturados y poli-insaturados.

Se realizó una exploración estadística de los datos para determinar si existía un patrón de distribución de las estaciones en el área de estudio. Para ello, se utilizó la técnica de análisis factorial (AF) por extracción de componentes principales (Davis, 1986). Para validar la separación de los factores y sus cargas, se aplicó un análisis de variancia multivariado (ANVAMU) de Wilks y Rao (una medida de la razón de la variancia dentro de los grupos y la variancia total de los mismos).

Con las λ de Wilks y R de Rao que resultaron ser estadísticamente significativas se realizó una prueba de honestidad de Tukey (para muestras de tamaño desigual), para conocer cuál de las medias de los grupos contribuía a las diferencias significativas; esto es, nos permitió identificar qué grupos en particular son diferentes entre sí. Se utilizó el programa STATISTICA para todos estos análisis.

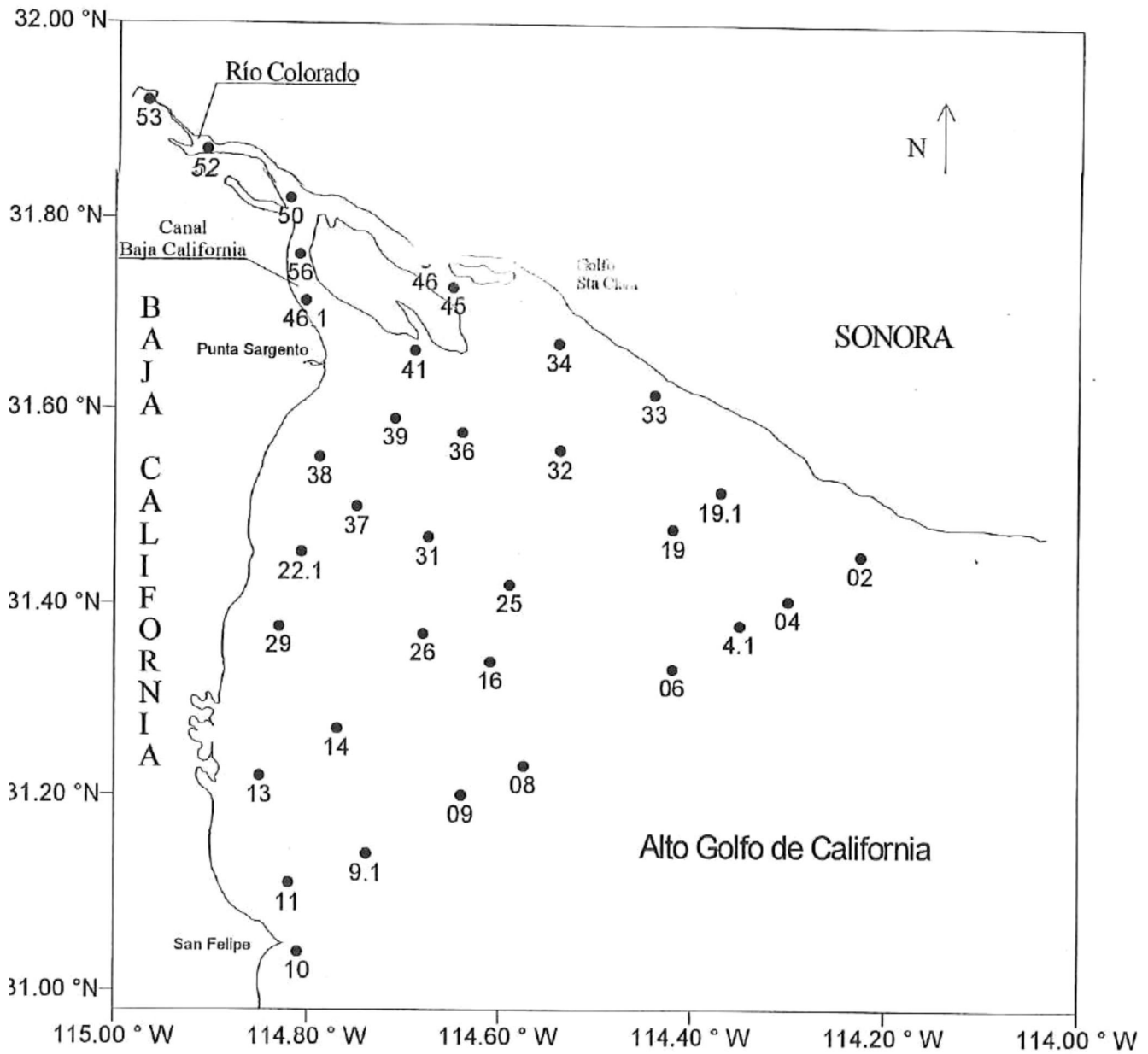


Figura 2.1. Estaciones de muestreo en el delta del río Colorado.

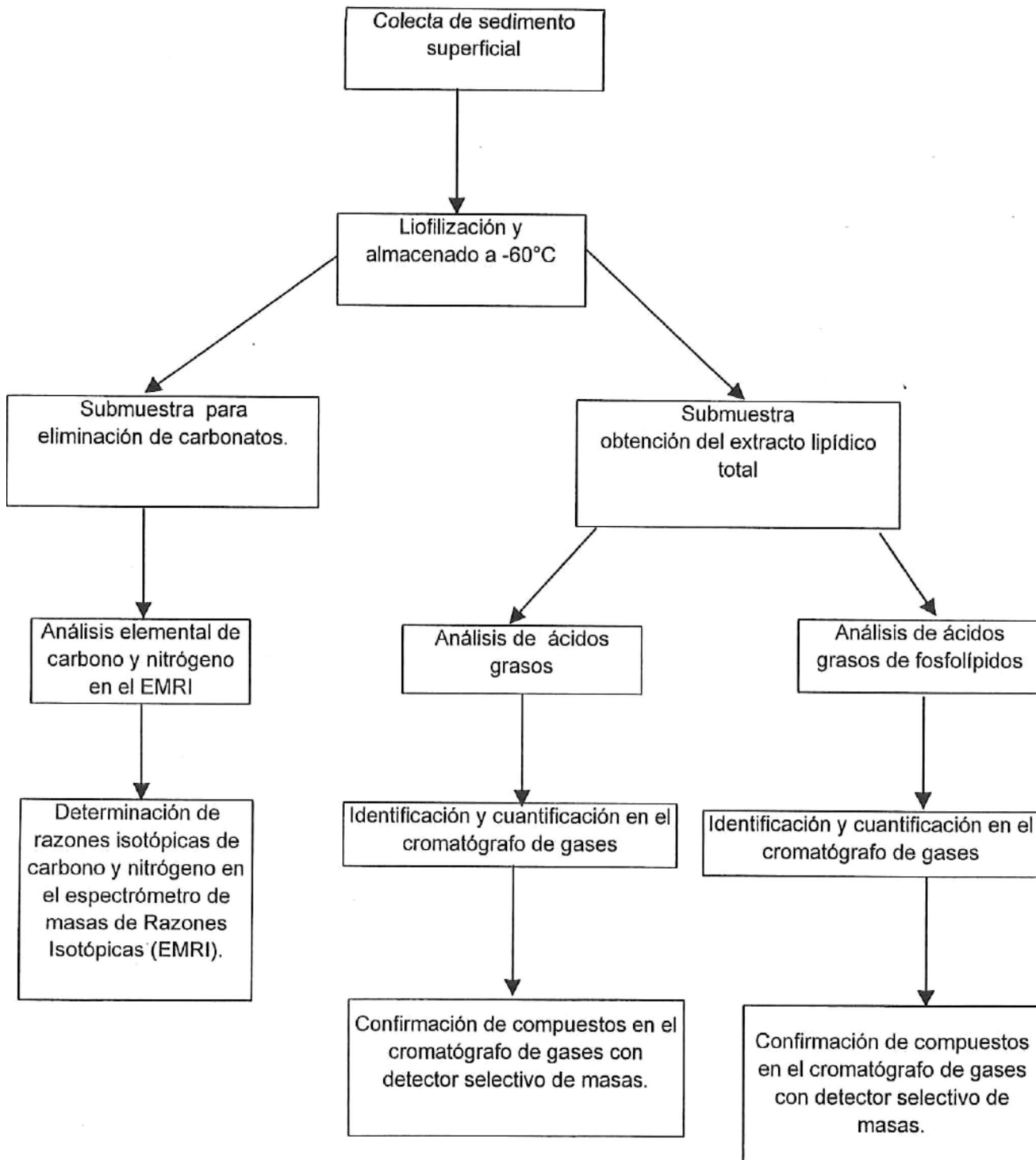


Figura 2.2. Diagrama de flujo de la metodología general.

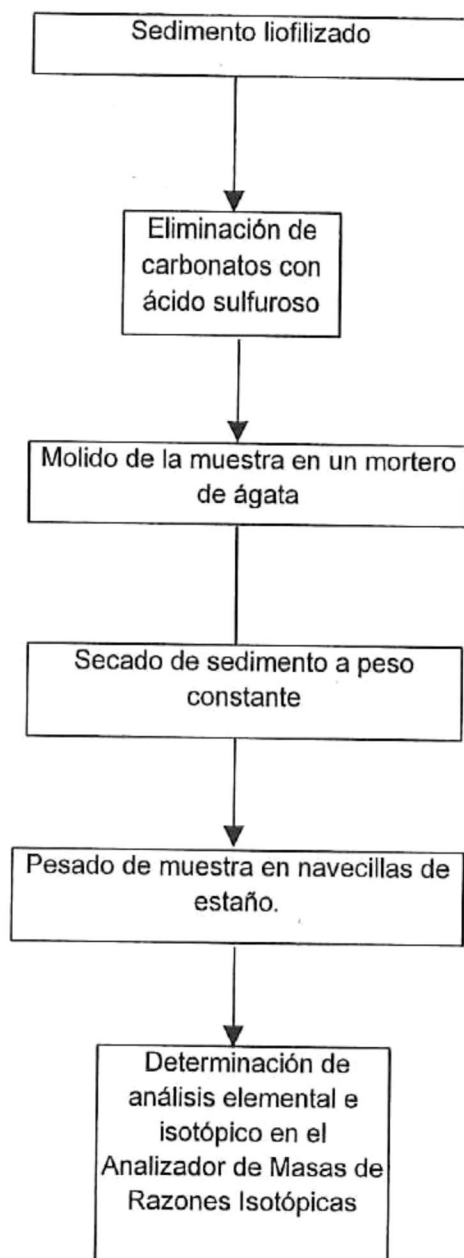


Figura 2.3. Diagrama de flujo de la determinación de isótopos estables de C y N. Modificado de Verardo *et al.* (1990).

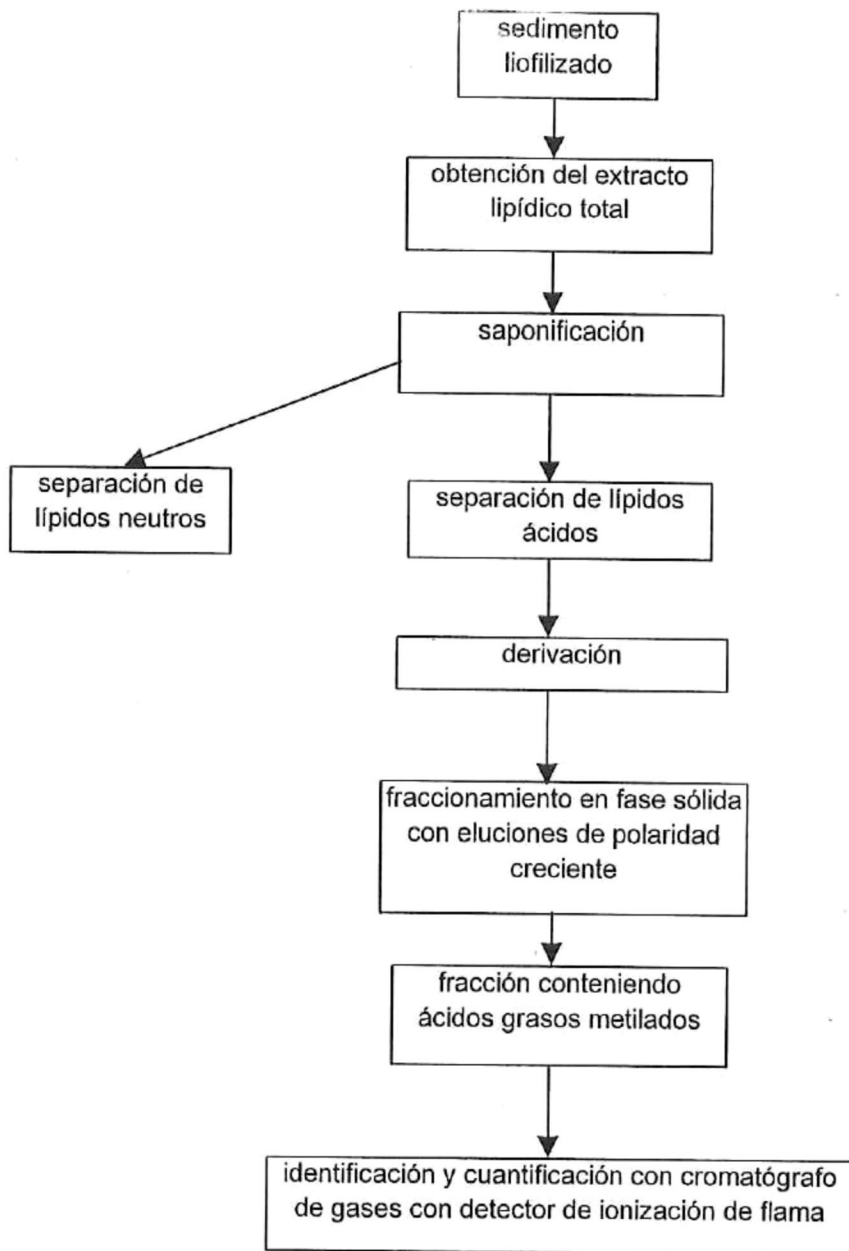


Figura 2.4. Diagrama de flujo de la determinación de ácidos grasos.

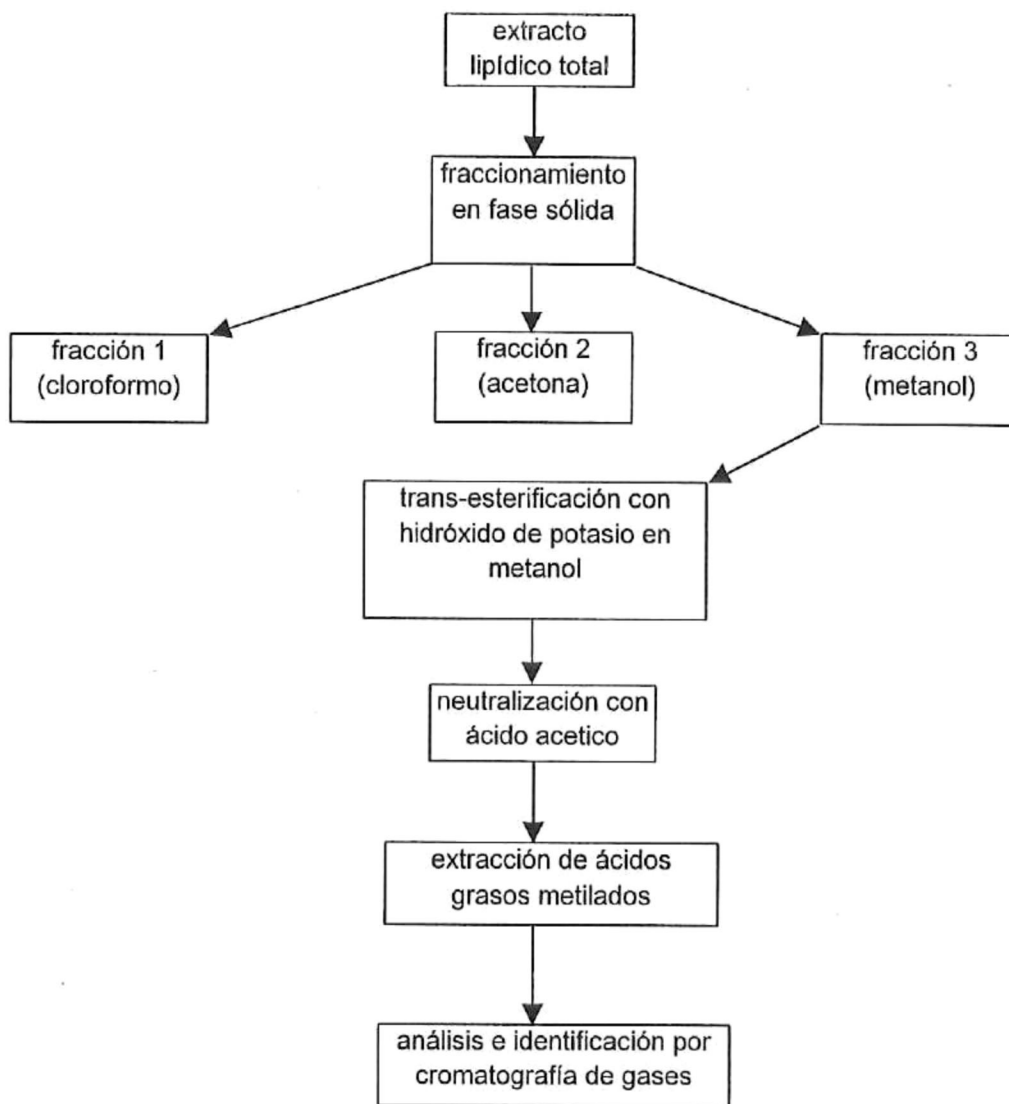


Figura 2.5. Diagrama de la determinación de ácidos grasos de fosfolípidos.

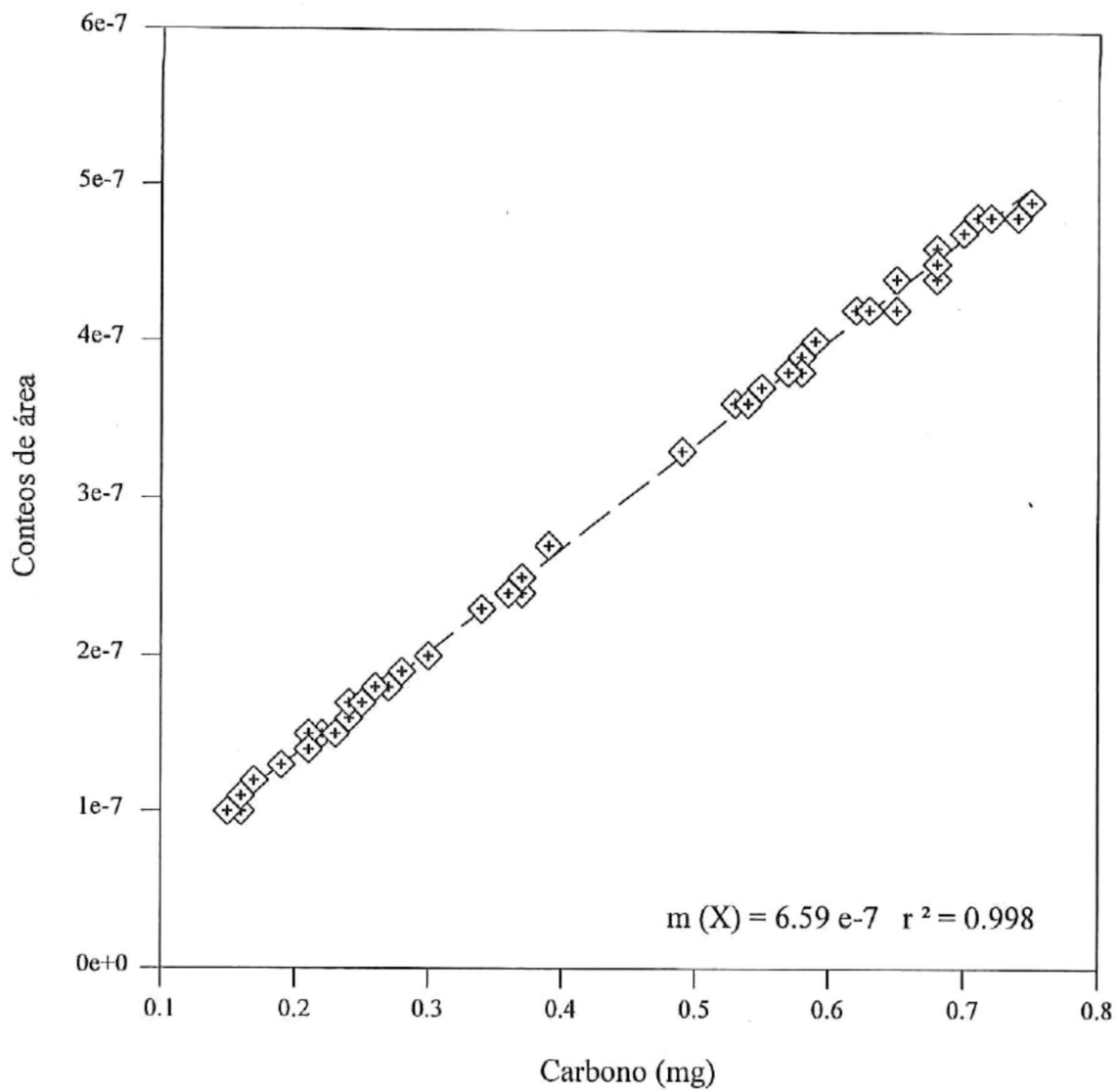


Figura 2.6. Curva de calibración de carbono usando BBOT como estándar.

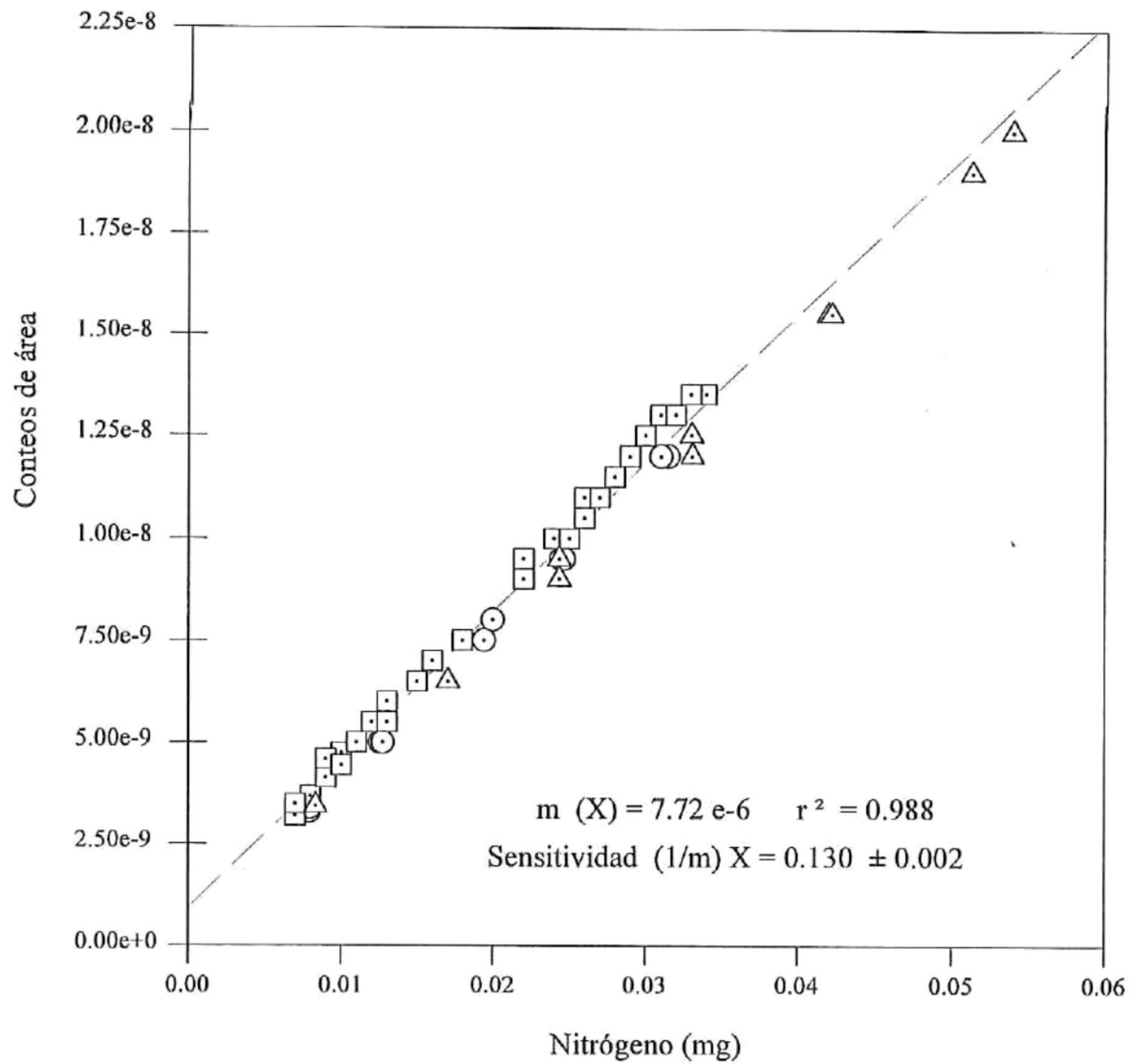


Figura 2.7. Curvas de calibración de nitrógeno usando BBOT como estándar. Los símbolos indican diferentes fechas de calibración durante el a período de análisis de muestras.

CAPÍTULO 3. COMPOSICIÓN ELEMENTAL DE CARBONO Y NITRÓGENO.

3.1. Trazadores moleculares de carbono y nitrógeno .

Los isótopos estables de nitrógeno y carbono han sido utilizados para inferir la fuente, composición y flujos de la materia orgánica (Cranwell *et al.*, 1982; Wilson *et al.*, 1985; Hedges *et al.*, 1984, 1986; Wolaver *et al.*, 1986; Fry y Sherr, 1988; Gearing, 1988; Coleman y Fry, 1993), así como para evaluar compuestos orgánicos de diferentes pesos moleculares en un gradiente espacial (Benner *et al.*, 1997). La utilización de estos trazadores moleculares puede ser especialmente útil en el delta del Colorado, donde las fuentes recientes y distribución de la materia orgánica pudieran ser difíciles de resolver.

Las características heterotróficas en la cuenca estuarina (Orozco-Borbón, 1995) y la alta productividad primaria hacia la zona oceánica (Santamaría-del-Angel *et al.*, 1996), sugieren la existencia de un gradiente río-océano en la calidad (v.g. composición) de la materia orgánica sedimentaria. Sin embargo, las corrientes de marea parecen influenciar la distribución del material orgánico terrígeno refractario que se exporta desde la cuenca estuarina del delta al Alto Golfo de California (Carriquiry 1992 a, b; Carriquiry *et al.*, 1993; Cupúl-Magaña, 1994; Zamora-Casas, 1993).

Se han encontrado diferentes velocidades de corriente residual en ambas costas del delta del Colorado. En la de Baja California, directamente influenciada por la descarga de la cuenca estuarina, se han encontrado zonas de bajas velocidades de corriente residual (<1 cm/seg), lo que contrasta con los altos valores (> 4 cm/seg) en la costa de Sonora. La influencia del patrón hidrodinámico, con diferencias tan marcadas entre las costas, pudiera provocar un cambio espacial significativo en la composición de la materia orgánica sedimentaria.

En este capítulo se aborda el problema de la caracterización de la materia orgánica sedimentaria en el delta del río Colorado. Se examina la variabilidad espacial del $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ y las razones C/N en la matriz orgánica total. La distribución de la composición orgánica permite estimar las principales fuentes orgánicas y determinar zonas estadísticamente diferentes en el área de estudio.

3.2. Resultados.

Los valores de $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ y las razones C/N presentaron una gran variación espacial (Tabla 3.1). Los valores de $\delta^{13}\text{C}$ en los sedimentos del delta variaron de -23.8 a -15.5‰ (promedio = $-20.6 \pm 1.6\text{‰}$). Los valores más negativos caracterizaron la zona estuarina y los menos negativos se encontraron en dirección hacia el océano. Dentro del gradiente de la cuenca estuarina al océano, los $\delta^{13}\text{C}$ menos negativos se encontraron hacia la costa de Sonora y los más negativos hacia la costa de Baja California y río arriba (Figuras 3.1; 3.2). Los valores de $\delta^{15}\text{N}$ variaron de 2.6 a 15‰ (promedio = $9.2 \pm 3.3\text{‰}$) con un patrón de distribución espacial complejo; los valores mínimos se encontraron hacia el suroeste del delta, frente al estero La Ramada (estaciones 13, 25, 16) y los máximos hacia la costa de Sonora y área de San Felipe B.C., pero no siguieron el mismo patrón de cambio que el $\delta^{13}\text{C}$ (Figura 3.3). Los valores de la razón C/N variaron de 14.6 a 3.7 (promedio = 7.6 ± 2.1) con los máximos río arriba y hacia el canal Sonora dentro de la zona estuarina (Figura 3.4).

El valor promedio del $\delta^{13}\text{C}$ del fitoplancton, colectado con una malla de $60\ \mu\text{m}$ fue $-16.3\text{‰} \pm 0.03$, el del micro-zooplancton ($250\ \mu\text{m}$) fue de $-16.8\text{‰} \pm 0.08$, el del pasto marino (*Distichlis palmeri*) fue de $-13.8\text{‰} \pm 0.14$, el detritus flotante en la cuenca estuarina fue de $-18.3\text{‰} \pm 0.05$ y el del sedimento del valle agrícola de Mexicali fue –

23.8‰. Estos resultados representaron los “miembros terminales” muestreados. No se obtuvieron valores $\delta^{15}\text{N}$ para éstos. Las razones C/N de fitoplancton, microzooplancton, pasto marino y suelo agrícola fueron 6.1, 3.7, 4 y 11.5, respectivamente. No se determinó C/N para el detritus orgánico flotante.

La relación de la razón C/N y $\delta^{13}\text{C}$ presentó una correlación positiva con $r^2 = 0.5$ (Figura 3.5). Este valor de correlación es análogo al que se ha reportado para estuarios que influyen áreas de ~40 km de largo (Matson y Brinson, 1990). Las estaciones con mayor contenido de ^{12}C estuvieron asociadas a altas razones C/N, mientras que las estaciones ricas en ^{13}C se asociaron con valores de C/N bajos.

Dentro del gradiente río-océano, las estaciones se agruparon en dos zonas que sugieren que la costa de Baja California y la de Sonora mantienen diferente composición de la materia orgánica sedimentaria (Figura 3.5). Sin embargo, la dispersión de los datos en la gráfica, sugiere que pueden existir otros procesos diferentes a la mera mezcla física de material terrígeno y marino. Esto se ve apoyado por el hecho de que el intervalo de $\delta^{13}\text{C}$ (-21.8 a -23.8) de las estaciones cercanas a la costa de Baja California es considerablemente menor que el intervalo de las razones C/N (14.6 a 7.2) correspondiente. Es notable que la estación 45 (canal Sonora) se agrupe con el valor isotópico encontrado para *Distichlis palmeri*, sugiriendo la influencia de aportes orgánicos de los pastizales hacia esta zona.

Considerando la totalidad de los datos, las correlaciones entre $\delta^{15}\text{N}$ y $\delta^{13}\text{C}$, C/N y distancia, fueron muy bajas y no permitieron discriminar un patrón claro entre estas variables, lo que sugiere una heterogeneidad espacial de los procesos biogeoquímicos en el área de estudio.

Los valores de $\delta^{15}\text{N}$ mostraron un incremento en los valores ($>10\%$) hacia la costa de Sonora y hacia el área de San Felipe. Los valores mínimos de $\delta^{15}\text{N}$ se encontraron en una zona transversa a la altura del estero La Ramada (estaciones 13, 25 y 16) y en la estación 4.1 en la costa de Sonora con un valor total de $+2.6\%$.

Se determinó arbitrariamente la estación Ferrocarril–Alto río como boca del río Colorado. Todavía en este punto corre agua superficial por el lecho del río para inmediatamente después desaparecer en el subsuelo. Para fines ilustrativos de esta variación espacial se consideró kilómetro cero las estaciones río arriba (Presa y Valle de Mexicali) junto con la estación Ferrocarril–Alto río. A partir de ésta estación, la materia orgánica se enriquece consistentemente en ^{13}C hacia la zona más oceánica del área de estudio, describiendo el gradiente río–océano con $r^2 = 0.4$ (Figura 3.6). Este enriquecimiento isotópico es mayor en las estaciones del canal y costa de Sonora, mientras que por el canal y costa de Baja California es notable la influencia de materia orgánica enriquecida en ^{12}C .

Las estaciones con $\delta^{13}\text{C}$ menos negativas (-15.5 a -19.2%) se distribuyen entre los 67 y 95 km, siguiendo la costa de Sonora (estaciones 45, 34, 36, 32, 33 y 4.1) donde existen sedimentos cuyo tamaño de grano medio es de 2 a 4 phi (Tabla 3.1). Es notable que las estaciones 22.1, 38, 14 y 10, en la costa de Baja California, que presentaron valores isotópicos más positivos (Tabla 3.1), están en la zona con altos valores de velocidad de corriente residual (~ 4 cm/seg).

Las estaciones con señal de $\delta^{13}\text{C}$ más negativa (-23.8 a -21.8%) se distribuyen del km 0 al 90 y comprenden las estaciones río arriba, el canal y hacia la costa de Baja California (estaciones 54, 53, 52, 50, 39, 26). El tamaño de grano medio reportado para

estas estaciones varía entre 4 y 7 phi. Los valores equivalentes de C/N contra km mostraron la misma tendencia que el enriquecimiento de ^{13}C y presentaron una correlación $r^2 = 0.5$.

El aparente patrón conservativo del $\delta^{13}\text{C}$ que se muestra en la figura 3.6, permitiría suponer una mezcla lineal de carbono orgánico terrígeno y marino para explicar la contribución terrígena a la materia orgánica sedimentaria dentro del delta del río Colorado.

En la exploración de los datos se aplicaron los modelos de Schultz y Calder (1976) y de Thornton y McManus (1994) para explicar la contribución terrígena a la materia orgánica sedimentaria presente en el área de estudio. Los resultados indican que la complejidad de este ecosistema no puede resolverse adecuadamente sólo con las aproximaciones propuestas por estos autores, ya que la distribución de las variables no sigue un patrón conservativo y no puede considerarse como una mezcla lineal de las fuentes orgánicas terrígenas y marinas en la escala espacial.

Para determinar el patrón de distribución espacial de la materia orgánica en el área de estudio se procedió a aplicar un análisis estadístico multivariado, considerando una matriz con las estaciones y los datos de las variables %C, C/N, $\delta^{15}\text{N}$, $\delta^{13}\text{C}$, distancia de la boca del río (km) y tamaño de grano medio ($M\phi$ ó Media). Aunque la variable %C no es independiente de la razón C/N, el programa estadístico empleado considera a todas las variables como independientes (Davis, 1986).

Tabla 3.1. Valores de isótopos y composición elemental de carbono y nitrógeno en sedimentos superficiales del delta del río Colorado.

| Estación | Distancia (Km) | Razón C/N | $\delta^{15}\text{N}$ | % N | $\delta^{13}\text{C}$ | % C | Tamaño de grano medio |
|------------|----------------|-----------|-----------------------|------|-----------------------|------|-----------------------|
| Presa | 0.0 | 8.5 | 7.69 | 0.10 | -22.81 | 0.83 | |
| Valle | 0.0 | 11.5 | 5.82 | 0.04 | -23.78 | 0.43 | |
| AR | 0.0 | 11.2 | 9.79 | 0.05 | -22.25 | 0.54 | |
| 54 | 0.0 | 7.6 | 7.18 | 0.01 | | 0.63 | 4.5 |
| 53 | 7.7 | 8.3 | 10.53 | 0.10 | -23.40 | 0.82 | 3.2 |
| 52 | 17.7 | 14.6 | 8.54 | 0.01 | -23.56 | 0.15 | 4.2 |
| 50 | 29.2 | 14.2 | 14.05 | 0.22 | -21.82 | 3.06 | 4.9 |
| 56 | 35.4 | 8.4 | | 0.01 | -23.19 | 0.04 | 3.8 |
| 46.1 | 45.4 | 8.0 | 8.69 | 0.04 | -19.67 | 0.35 | |
| 39 | 63.1 | 7.3 | 8.70 | 0.03 | -22.72 | 0.18 | 3.7 |
| 38 | 63.9 | 6.5 | 11.45 | 0.08 | -19.38 | 0.51 | 7.5 |
| 37 | 70.8 | | 15.01 | 0.07 | | | 5.7 |
| 22.1 | 75.4 | 6.5 | | 0.07 | -18.55 | 0.44 | |
| 29 | 85.4 | 6.8 | | 0.03 | -21.05 | 0.23 | 5.1 |
| 31 | 77.7 | 6.9 | | 0.06 | -20.55 | 0.39 | 6.9 |
| 25 | 87.7 | 7.1 | 4.60 | 0.06 | -20.87 | 0.42 | 6.7 |
| 26 | 89.2 | 7.2 | 9.02 | 0.04 | -21.75 | 0.32 | 4.9 |
| 13 | 105.4 | 6.3 | 2.98 | 0.06 | -19.33 | 0.36 | 4.5 |
| 14 | 97.7 | 6.7 | 6.13 | 0.07 | -20.46 | 0.45 | 6.7 |
| 16 | 94.6 | 7.0 | 5.28 | 0.08 | -20.12 | 0.52 | 6.9 |
| 08 | 107.7 | | 2.63 | | -19.60 | | 6.2 |
| 09 | 108.5 | 6.6 | 11.07 | 0.06 | -20.86 | 0.34 | 7.2 |
| 9.1 | 114.6 | 6.1 | 9.66 | 0.05 | -21.12 | 0.29 | |
| 11 | 117.0 | 6.9 | 13.50 | 0.07 | -20.18 | 0.49 | 7.6 |
| 10 | 126.2 | 5.9 | 14.19 | 0.02 | -19.84 | 0.14 | 4.7 |
| 46 | 47.7 | 7.2 | 8.69 | 0.04 | -20.66 | | 3.3 |
| 45 | 67.7 | 3.7 | 14.36 | 1.71 | -15.45 | | 3.3 |
| 41 | 68.1 | 7.2 | 10.90 | 0.07 | -19.82 | 0.32 | |
| 34 | 69.2 | 8.1 | 10.86 | 0.03 | -20.15 | 6.33 | 4.0 |
| 36 | 81.6 | 7.5 | 11.38 | 0.03 | -19.19 | 0.53 | 1.3 |
| 32 | 80.8 | 6.2 | 10.25 | 0.07 | -19.58 | 0.24 | 3.9 |
| 33 | 90.0 | 8.4 | 10.21 | 0.04 | -18.99 | 0.21 | 2.5 |
| 19 | 95.4 | 7.5 | 14.00 | 0.03 | -19.54 | 0.44 | 2.3 |
| 19.1 | 105.4 | 7.1 | 7.77 | 0.07 | -20.81 | 0.34 | 3.9 |
| 04 | 106.2 | 6.6 | 8.83 | 0.03 | -20.34 | 0.25 | |
| 4.1 | 122.3 | 6.8 | 8.47 | 0.06 | -20.79 | 0.47 | 3.0 |
| 06 | 120.8 | 7.2 | 2.60 | 0.06 | -19.29 | 0.20 | |
| 02 | 119.2 | 6.3 | 9.17 | 0.06 | -21.08 | 0.45 | 4.7 |
| Promedio | 73.5 | 7.7 | 9.24 | 0.10 | -20.63 | 0.64 | 4.7 |
| Desv. Std. | 38.7 | 2.1 | 3.33 | 0.27 | 1.65 | 1.12 | 1.7 |

3.2.a. Análisis factorial en modo Q.

Los resultados de este análisis (Figura 3.7) revelaron la presencia de cuatro grupos bien diferenciados en el área de estudio (Figuras 3.8, 3.9; Tabla 3.2). Las estaciones que no presentaron datos en alguna de las variables medidas, fueron eliminadas de la matriz de datos y no fueron consideradas en el análisis estadístico.

TABLA 3.2. VALORES ESTADÍSTICOS DEL PROMEDIO Y DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE LAS VARIABLES PARA CADA UNO DE LOS GRUPOS OBTENIDOS DEL ANÁLISIS FACTORIAL.

| grupo | <i>n</i> | Razón C/N | $\delta^{15}\text{N}$ | $\delta^{13}\text{C}$ | $M\phi^{***}$ |
|-------|----------|----------------|-----------------------|-----------------------|---------------|
| 1 | 8 | 6.6 ± 0.5 | 8.2 ± 4.6 | -20.3 ± 0.8 | 3.7 ± 1.1 |
| 2 | 6 | 7.5 ± 0.8 | 10.9 ± 1.8 | -19.7 ± 0.6 | 2.9 ± 1.0 |
| 3 | 5 | 11.3 ± 3.6 | 10.6 ± 2.6 | -22.1 ± 1.8 | 4.1 ± 0.6 |
| 4 | 7 | 6.8 ± 0.4 | 8.5 ± 3.6 | -20.8 ± 0.6 | 6.8 ± 0.9 |
| 5* | 1 | 3.7 ± 0.0 | 14.4 ± 0.0 | -15.5 ± 0.0 | 3.3 ± 0.0 |
| 6** | 1 | 6.5 ± 0.0 | 11.5 ± 0.0 | -19.4 ± 0.0 | 6.5 ± 0.0 |

* características de composición de la estación 45

** características de composición de la estación 38

*** tamaño medio de grano en unidades Phi (Carriquiry y Sánchez, 1999).

3.2.b. Resultados generales de los grupos.

El grupo 1 comprende la región sureste del delta (área frente a Puerto Peñasco, Sonora) e incluye las estaciones 2, 4, 4.1, 6, 10, 13, 19 y 19.1. Este grupo presenta los valores promedio más bajos de la razón C/N (6.6) y de $\delta^{15}\text{N}$ (8.2‰). El $\delta^{13}\text{C}$ promedio (-20.3‰) en la costa de Sonora es el segundo valor menos negativo de los cuatro grupos. La textura de este grupo de estaciones fue caracterizada por arenas muy finas (Tabla 3.2).

Las estaciones 32, 33, 34, 36, 41 y 46, conforman el grupo 2 que se encuentra en el noreste del litoral y canal sonorenses (área frente al golfo de Santa Clara). Los valores promedio de $\delta^{13}\text{C}$ (-19.7‰) y $\delta^{15}\text{N}$ (10.9‰) fueron los más positivos de todos los grupos. El valor relativamente bajo de la razón C/N (7.5) puede ser relacionado con las otras variables de este grupo que sugieren un aporte marino a esta zona. El tamaño de grano correspondiente a arenas finas caracteriza este grupo de estaciones (Tabla 3.2).

El grupo 3, con las estaciones 39, 46.1, 50, 52 y 53, se encuentra en la región norte de la costa de Baja California, incluyendo el lecho del río y canal B.C. El $\delta^{13}\text{C}$ promedio fue el valor más negativo (-22.1‰), junto con la más alta razón C/N promedio (11.3) en los grupos encontrados. Estas variables también presentaron las más altas desviaciones estándar. El $\delta^{15}\text{N}$ promedio (10.6‰) fue relativamente alto, muy similar al encontrado en el grupo 2. La textura del sedimento correspondió a limos gruesos (Tabla 3.2).

El grupo 4, compuesto por las estaciones 9, 9.1, 11, 14, 16, 25 y 26, caracterizó a los sedimentos de la región central y suroeste en la costa de Baja California. Los valores promedio de $\delta^{13}\text{C}$ (-20.8‰), $\delta^{15}\text{N}$ (8.5‰) y de la razón C/N (6.8) fueron similares a los del grupo 1; sin embargo, los valores de tamaño medio de grano tuvieron texturas correspondientes a limos finos (Tabla 3.2). Cabe señalar que las estaciones 13 (estero la Ramada) y 10 (San Felipe) que presentaron una señal $\delta^{13}\text{C}$ característica de influencia fitoplanctónica, están situadas en la costa de Baja California pero, por su composición orgánica marina, estadísticamente pertenecen al grupo 1 caracterizado por tamaños de grano medio entre 3 y $<2\phi$. La estación 45 mostró valores $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ muy positivos lo que sugiere la influencia de los aportes de los pastos marinos en esta zona. La estación 38 se caracterizó como una señal marina por su valor de $\delta^{13}\text{C}$; sin embargo, su valor de $M\phi$ corresponde a limos finos, lo que la diferencia de las estaciones del grupo 2 (Tabla 3.2). Los resultados de los grupos 1 y 2 sugieren una influencia de material orgánico marino que aumenta de sur a norte a lo largo de la costa y canal sonoreense. Por la costa de Baja California, las estaciones de los grupos 3 y 4 presentan una distribución de valores isotópicos y elementales que sugieren la influencia de materia orgánica terrígena que se distribuye de norte a sur.

3.2.c. Análisis factorial en modo R.

Para determinar la **interrelación de las variables dentro de los grupos** de estaciones resultantes del análisis factorial, se aplicó a cada uno de estos grupos un análisis factorial en modo R por extracción de componentes principales (Davis, 1986).

La carga y comunalidad de las variables y el porcentaje de variabilidad de los factores de cada grupo se presenta en la Tabla 3.3. La proporción de la variancia de las variables, que depende de factores comunes (comunalidad) presentó valores > 0.5 , con excepción del grupo 1 donde la comunalidad del $\delta^{13}\text{C}$ y la distancia (km) son < 0.5 .

TABLA 3.3. MATRIZ VARIMAX DE LOS FACTORES, COMUNALIDADES DE CADA VARIABLE Y VARIANCIA DE LOS TRES FACTORES EN LOS SEDIMENTOS SUPERFICIALES EN EL DELTA DEL RÍO COLORADO.

| grupo | Variable | factor 1 | factor 2 | Comunalidad |
|-------|-----------------------|----------|----------|-------------|
| 1 | C/N | 0.85 | 0.15 | 0.74 |
| | $\delta^{15}\text{N}$ | -0.80 | -0.45 | 0.84 |
| | $\delta^{13}\text{C}$ | 0.13 | 0.64 | 0.43 |
| | % C | 0.59 | 0.64 | 0.76 |
| | Media (M ϕ) | -0.26 | 0.89 | 0.86 |
| | km | -0.68 | 0.004 | 0.46 |
| | Variancia | 42.5% | 25.6% | |
| 2 | C/N | 0.10 | 0.76 | 0.58 |
| | $\delta^{15}\text{N}$ | 0.70 | 0.34 | 0.61 |
| | $\delta^{13}\text{C}$ | 0.92 | 0.01 | 0.85 |
| | % C | -0.06 | -0.95 | 0.91 |
| | Media (M ϕ) | -0.06 | -0.52 | 0.61 |
| | km | 0.97 | 0.01 | 0.95 |
| | Variancia | 50.9% | 24.3% | |
| 3 | C/N | -0.62 | 0.55 | 0.68 |
| | $\delta^{15}\text{N}$ | 0.18 | 0.95 | 0.93 |
| | $\delta^{13}\text{C}$ | 0.91 | 0.08 | 0.84 |
| | % C | -0.09 | 0.96 | 0.92 |
| | Media (M ϕ) | 0.85 | 0.28 | 0.80 |
| | km | 0.84 | 0.26 | 0.77 |
| | Variancia | 45.5% | 36.6% | |
| 4 | C/N | -0.82 | 0.13 | 0.68 |
| | $\delta^{15}\text{N}$ | 0.75 | -0.14 | 0.58 |
| | $\delta^{13}\text{C}$ | 0.14 | 0.99 | 0.99 |
| | % C | -0.32 | 0.93 | 0.96 |
| | Media (M ϕ) | 0.73 | 0.61 | 0.90 |
| | Km | 0.67 | 0.16 | 0.97 |
| | Variancia | 48.2% | 36.4% | |

3.2.d. Caracterización estadística de las estaciones del grupo 1.

En el grupo 1 se encontraron dos factores que explican el 68% de la variancia total. En la figura 3.10 se muestra la contribución de los variables de los factores 1 y 2. El factor 1 explica el 42.5% de la variancia total y está formado por las variables $\delta^{15}\text{N}$, razón C/N, %C y distancia (Figura 3.10.a). El factor 2, que explica el 25.6% de la variancia, está compuesto de las variables $\delta^{13}\text{C}$, %C y tamaño de grano (Figura 3.10.b). Cabe señalar que la contribución del %C es casi de igual magnitud en ambos factores. La representación espacial del factor 1 y factor 2 (Figura 3.10.c) muestra gráficamente la interrelación de las variables de composición y físicas.

En el factor 1 las cargas negativas de $\delta^{15}\text{N}$ y distancia muestran que el gradiente espacial río-océano está asociado al valor de $\delta^{15}\text{N}$ en los sedimentos, y que estas variables se asocian inversamente con la razón C/N.

En la distribución espacial del grupo 1 estas asociaciones sugieren que las variables distancia y el tamaño de grano son importantes para determinar la distribución de la composición orgánica en los sedimentos de la zona sureste del área de estudio. Para determinar la significación de estas relaciones se realizó un análisis de regresión. Se encontró que el gradiente río-océano desde la estación Ferrocarril hasta la plataforma oceánica adyacente no presenta un control significativo sobre el cambio de $\delta^{15}\text{N}$ y la razón C/N de la materia orgánica superficial (Figuras 3.11.a, b).

Por otro lado, conforme disminuye la razón C/N el valor $\delta^{15}\text{N}$ aumenta, dando como resultado una relación inversa y significativa que fundamenta que el origen del nitrógeno orgánico en el grupo 1 tiene una fuerte influencia de materia orgánica fitoplanctónica. Esto es particularmente evidente para la estación 10 (San Felipe), donde se registraron $\delta^{15}\text{N} = 14.2$ y razón C/N = 5.9 (Figura 3.11.c). Sin embargo, para la estación 13 (estero La Ramada) se registraron valores de $\delta^{15}\text{N} = 3\text{‰}$ y razón C/N = 6.3 muy bajos, mientras que el valor $\delta^{13}\text{C} = -19.3\text{‰}$ sugiere una influencia fitoplanctónica. La heterogeneidad de la composición orgánica sedimentaria en la escala espacial puede reflejarse en valores de correlación bajos. En la figura 3.11.d se muestra que la razón C/N presenta un coeficiente de correlación inverso y significativo con respecto al tamaño de grano medio de los sedimentos; al aumentar $M\phi$, la razón C/N disminuye (v.g. en las estaciones 6, 10 y 13). Las relaciones $\delta^{13}\text{C}$ -tamaño de grano y %C-tamaño de grano presentaron correlaciones positivas (Figuras 3.11.e, f).

3.2.e. Caracterización estadística de las estaciones del grupo 2.

En este grupo de estaciones, que comprende el noreste del área de estudio, los factores 1 y 2 explican el 75% de la variancia total (Figuras 3.8 y 3.12). Las variables que caracterizan al factor 1 son $\delta^{15}\text{N}$, $\delta^{13}\text{C}$ y distancia que explican el 51% de la variancia (Figura 3.8.a). El factor 2 está constituido por las variables razón C/N, %C y tamaño de grano que explican el 24% de la variancia (Figura 3.8.b).

La representación de las cargas de los factores 1 y 2 (Figura 3.8.c) señala que el cambio espacial (km) tiene un efecto significativo sobre los valores $\delta^{15}\text{N}$ y $\delta^{13}\text{C}$; mientras

que las cargas negativas ($M\phi$, %C) y la carga positiva del factor 2 (razón C/N) muestran que, en el grupo 2, estas variables se relacionan de manera inversa.

El valor promedio del $\delta^{15}\text{N}$ y $\delta^{13}\text{C}$ (10.9 ± 1.8 y -19.7 ± 0.6 , respectivamente) de las estaciones frente al golfo de Santa Clara y el análisis de regresión entre $\delta^{15}\text{N}$ y $\delta^{13}\text{C}$ ($r = 0.6$) indica la influencia de aportes fitoplanctónicos a la matriz sedimentaria (Figura 3.13.a).

En el grupo 2 el contenido isotópico de carbono y nitrógeno en los sedimentos está correlacionado significativamente ($p < 0.01$) al gradiente espacial (Figuras 3.13.b, c). En las estaciones 32, 33, 34 y 36 al aumentar la distancia a partir de la boca del río los valores de $\delta^{15}\text{N}$ y $\delta^{13}\text{C}$ se vuelven más positivos, mientras que en la estación 46 (dentro del canal Sonora) presentan un valor más negativo. En estas estaciones se encontraron correlaciones negativas y significativas de la razón C/N con el tamaño de grano y con la concentración de carbono (Figuras 3.13d, e).

3.2.f. Caracterización estadística de las estaciones del grupo 3.

Las estaciones situadas al noroeste del delta del río Colorado definen el grupo 3 (Figura 3.9). Los resultados del análisis factorial se muestran en la figura 3.14. Se encontró que dos factores explican el 85% de la variabilidad total. El factor 1, que explica un 48% de la variancia, muestra que el tamaño de grano, distancia, $\delta^{13}\text{C}$ y razón C/N son las variables que contribuyen con mayores cargas positivas a esta componente (Figura 3.14.a). El factor 2 (Figura 3.14.b), que explica el 36% de la variabilidad total, muestra que las cargas $\delta^{13}\text{C}$, %C y el tamaño de grano medio contribuyen significativamente a la variancia total de este factor. La razón C/N muestra un patrón inverso con el resto de las

variables; este mismo resultado se encontró en la caracterización estadística de los grupos 1 y 2.

Los análisis de regresión indicaron que las correlaciones entre %C y $\delta^{13}\text{C}$ y entre distancia y $\delta^{15}\text{N}$ no son significativas (Figuras 3.15.a, b). Las relaciones entre $\delta^{15}\text{N}$ y %C, C/N y distancia, C/N y tamaño de grano, y $\delta^{13}\text{C}$ y tamaño de grano, mostraron coeficientes de correlación significativos con un $\alpha < 0.05$ (Figuras 3.15.c, d, e, f).

La figura 3.15.c muestra que la razón C/N cambia de 13 para en las estaciones 53, 52, 50 (río arriba), a 7 para las estaciones 46.1 y 39, (canal B.C. y plataforma oceánica). Asimismo, la correlación entre $\delta^{13}\text{C}$ y tamaño de grano y C/N, (Figuras 3.15.d, f) resultó significativa ($p < 0.01$ y < 0.03 respectivamente). Esto indica que el valor phi de las partículas es mayor río arriba (2.8 phi) y está asociado a altas razones C/N y valores mas negativos de $\delta^{13}\text{C}$.

3.2.g. Caracterización estadística de las estaciones del grupo 4.

Las estaciones situadas al suroeste del delta del río Colorado definen el grupo 4 (Figura 3.8). Los resultados del análisis factorial aplicados a este área se muestran en la figura 3.16. Los factores 1 y 2 explican el 85% de la variancia total. El factor 1, que contribuye con el 46% de la variancia, se caracteriza por una asociación de $\delta^{13}\text{C}$, razón C/N, $M\phi$ y distancia, (Figura 3.16.a). El factor 2, con 37% de variancia, está constituido por $\delta^{15}\text{N}$, %C y razón C/N (Figura 3.16.b).

La gráfica bidimensional del factor 1 y el factor 2 (Figura 3.16.c) muestra la interrelación de todas las variables. Las contribuciones del tamaño de grano medio y

distancia (km) en el factor 1 sugieren un control sobre el $\delta^{13}\text{C}$. Estas variables ($M\phi$ y distancia) se relacionan inversamente con la razón C/N.

Para determinar si existe una interrelación significativa de las variables anteriores, se realizó un análisis de correlación. Los resultados indican una relación estadísticamente significativa para $\delta^{13}\text{C}$ vs. $M\phi$, %C y también para $\delta^{15}\text{N}$ vs distancia (Figuras 3.17.a, b, c). Las correlaciones $\delta^{13}\text{C}$ vs km y $\delta^{15}\text{N}$ vs %C no fueron significativas (Figuras 3.17.d, e).

La zona representada por el grupo 4 muestra la influencia de la descarga de la cuenca estuarina. En las figuras 3.17 (a, b) se observa que el $\delta^{13}\text{C}$ tiende hacia valores menos negativos (de -21.4 a -20.2‰) cuando el diámetro de los sedimentos disminuye a limos y arcillas (7.6ϕ) y el porcentaje de carbono aumenta (0.3 a 0.5). Esto sugiere que las bajas velocidades de corriente residual (<1 cm/seg) permitirían que los aportes orgánicos alóctonos se pudieran mezclar con partículas de tamaños muy finos provenientes de la descarga de la cuenca estuarina.

En la figura 3.17.c podemos observar que las estaciones 14, 16, 25 y 26 presentan valores de $\delta^{15}\text{N}$ de 5 a 7‰ , que sugieren aportes de fuentes terrígenas o material que muestra efectos de diagénesis (Ostrom *et al.*, 1997). Las estaciones 9, 9.1 y 11 se caracterizan por valores $\delta^{15}\text{N}$ más positivos (9 a 13‰) que sugieren aportes orgánicos marinos.

3.3. *Discusiones.*

En el delta del Colorado la variación espacial de la composición orgánica en la matriz sedimentaria parece estar influenciada por las corrientes de marea, que aportan y distribuyen materiales de diferentes orígenes. Sin embargo, nuestros resultados indican que la mezcla y remineralización de la materia orgánica son elementos activos que contribuyen a definir zonas biogeoquímicas dentro de este ecosistema.

Los intervalos de los valores de $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ y las razones C/N en el área de estudio son comparables con los reportados para sedimentos costeros que varían, respectivamente, de -18 a -26.4‰ , de $+5.8$ a $+10\text{‰}$ y 6.4 a 11.8 (Peters *et al.*, 1978; Sweeney y Kaplan, 1980; Wada *et al.*, 1987; Holmes *et al.*, 1996).

La aproximación tradicional para explicar orígenes y destinos de la materia orgánica en estuarios activos, se fundamenta en una mezcla física de las fuentes orgánicas (Schultz y Calder, 1976; LeBlanc, 1989; Matson y Brinson, 1990; Thornton y McManus, 1994). En el delta del Colorado, considerar sólo los procesos físico-hidrológicos resulta incompleto para explicar la composición espacial de la materia orgánica.

La ausencia de aportes ribereños y el régimen de mareas generan una importante contribución de material proveniente del depósito deltáico. Sin embargo, a pesar de esta visible contribución que implicaría substantivos aportes orgánicos terrígenos, los resultados de $\delta^{13}\text{C}$ en la mayor parte del área de estudio indicaron mezclas orgánicas con influencia de material marino. Por otro lado, los valores de $\delta^{15}\text{N}$ y de las razones C/N sugieren procesos de diagénesis que modifican las señales marinas y terrígenas.

Esta interacción de fuentes orgánicas y procesos físicos resulta en una matriz sedimentaria con una composición orgánica compleja y difícil de clasificar en un gradiente espacial. La determinación múltiple de trazadores elementales e isotópicos y la utilización de análisis multivariado en la matriz de datos permitió definir áreas estadísticamente diferentes de la matriz orgánica en el delta.

3.3.a. Isótopos de carbono.

La baja correlación entre la razón C/N y el $\delta^{13}\text{C}$ ($r^2 = 0.5$) indica que existen procesos que cambian la composición orgánica de los miembros terminales evaluados en el área de estudio. Los procesos diagenéticos pueden enriquecer de nitrógeno la materia terrígena lábil o empobrecer de nitrógeno el material fitoplanctónico haciendo variar las razones C/N de las fuentes orgánicas originales (Hedges y Oades, en prensa).

El cambio de $\delta^{13}\text{C}$ desde la boca del río a la plataforma oceánica adyacente con una $r^2 = 0.4$ indica que la heterogeneidad orgánica en los sedimentos del delta sólo puede explicarse considerando áreas definidas por similitudes en su composición. Estas zonas aparecieron como estadísticamente diferentes en el análisis factorial.

El valor promedio del $\delta^{15}\text{N}$ y $\delta^{13}\text{C}$ (10.9 ± 1.8 y -19.7 ± 0.6 , respectivamente) de las estaciones frente al golfo de Santa Clara (grupo 2) y el análisis de regresión de $\delta^{15}\text{N}$ vs $\delta^{13}\text{C}$ ($r = 0.6$) indican la influencia de aportes fitoplanctónicos a la matriz sedimentaria. En los sedimentos del área de San Felipe y golfo de Santa Clara se encontraron valores tan elevados como -19.8% . Los altos valores de productividad primaria y bajos valores de productividad bacteriana en la columna de agua (Santamaría-del-Angel *et al.*, 1996; Orozco-Borbón, 1995) sugieren que la fuente orgánica más importante que se registra en

los sedimentos de la costa de Sonora y área de San Felipe, B.C. es el material fitoplanctónico enriquecido en ^{13}C .

Los valores negativos $\delta^{13}\text{C}$ de los sedimentos del canal y costa de Baja California sugieren que el principal aportador de ^{12}C es el material orgánico proveniente del retrabajamiento de los depósitos deltáicos. Sin embargo, los valores de -23.4‰ de estos sedimentos fueron 3‰ menos negativos que los reportados en sedimentos superficiales, donde el ^{12}C proviene directamente del material orgánico terrígeno lábil aportado por ríos (Schultz y Calder, 1976; Peterson *et al.*, 1994).

Los valores isotópicos en el área del canal del río que serían representativos de la composición orgánica de la descarga estuarina, no son mucho más negativos que los -22.5‰ como los valores encontrados para los lodos turbidíticos del pleistoceno de núcleos del Golfo de México (Schultz y Calder, 1976). Si el material orgánico del depósito deltáico es efectivamente refractario, su composición isotópica tendería a ser poco variable. Gearing *et al.*, (1988) han indicado un cambio mínimo en la composición de $\delta^{13}\text{C}$ en detritus orgánico que ha sufrido una extensa degradación microbiana (más de 2 años). Por lo tanto, un material refractario sería más difícil de seguir oxidándose y cambiando su composición orgánica. Se ha encontrado que los procesos de sedimentación-resuspensión por efectos hidrodinámicos resulta en pequeñas variaciones de los valores $\delta^{13}\text{C}$ en material orgánico refractario (Richard *et al.*, 1997).

En nuestro área de estudio la estación 39 del grupo 3 muestra uno de los valores $\delta^{13}\text{C}$ más negativos (-22.7‰) y un valor $\text{C/N} = 7.3$ que es relativamente bajo. Estos valores difícilmente podrían ser considerados como directamente representativos de una zona influenciada por aportes terrígenos. Fry y Sherr (1984) han reportado para plancton marino

de regiones templadas valores de -19 a -22‰ , este intervalo comprende la mayoría de los valores encontrados en el delta. Comparativamente, la influencia de aportes de material terrígeno en el delta del Orinoco, resultó en altos valores C/N y $\delta^{13}\text{C}$ negativos (Kennicutt *et al.*, 1987). Nuestros resultados sugieren que la composición orgánica de los sedimentos de este área cambian principalmente por aportes orgánicos marinos dando un resultado promedio isotópicamente menos negativo. Richard *et al.*, (1997) encontraron, en estuarios activos, material orgánico particulado anómalamente enriquecido en ^{13}C que ha sido asociado a transporte por corrientes de marea.

Los valores isotópicos y elementales de los miembros terminales (Figura 3.5) no reflejaron la composición de la materia orgánica sedimentaria, excepto en la estación 45 (Canal Sonora) que presentó una composición isotópica y elemental que muestra la influencia de los extensos pastizales adyacentes. Esto sugiere que la diagénesis y reciclamiento del material orgánico lábil es alto en esta zona. La composición isotópica de la materia orgánica particulada puede variar significativamente debido a las fuentes inorgánicas de carbono y nitrógeno, la alta productividad o el cambio en la composición de especies fitoplanctónicas (Gearing *et al.*, 1988; Ostrom *et al.*, 1997). Asimismo las mezclas físicas de diferentes fuentes pueden dar una composición promedio que induce a errores de interpretación; al respecto, Hedges *et al.*, (1997) señalan que una mezcla de partes iguales de plantas C3 y C4 dan como resultado una señal que pareciera fitoplanctónica.

Los cambios diagenéticos en la materia orgánica involucran cambios sustantivos en la matriz orgánica resultante. Caracterizar estos cambios representa un considerable reto analítico, Wakeham *et al.*, (1997) lograron caracterizar sólo el 20% del carbono orgánico total de sedimentos del océano profundo. Silverberg (com. pers.) en el canal St. Lawrence,

Canadá, que presenta una gran resuspensión de sedimentos, estimó que sólo el 9% de la productividad primaria (PP) superficial llega a los sedimentos. En éstos aproximadamente el 6% de esta PP se remineraliza y entre 4 y 5% efectivamente se entierra.

Considerando la tasa de sedimentación de 5 mm/año en el delta del Colorado (Shumilin, com. pers.), las zonas biogeoquímicas estadísticamente definidas representarían una medición del promedio de los aportes orgánicos y procesos diagenéticos en un período aproximado de 2-3 años. Cualquier evento que cambiara la composición orgánica sedimentaria necesariamente tendría que ser mayor que este período. La variación espacial y temporal de las fuentes y productos orgánicos puede incrementar o limitar la magnitud de las reacciones diagenéticas que contribuyen a la variabilidad isotópica en los sedimentos (Ostrom *et al.*, 1997).

Los resultados indican que la composición orgánica sedimentaria del delta resulta de los procesos de mezcla física y diagénesis de las fuentes orgánicas en la escala espacial. Los valores poco negativos de $\delta^{13}\text{C}$ sugieren que la composición orgánica de la descarga de la cuenca estuarina es material refractario que se mezcla con carbono enriquecido en ^{13}C aportado por las aguas oceánicas que entran por la costa de Sonora.

En el delta del Colorado la distribución espacial de la composición orgánica sedimentaria estaría fuertemente influenciada por los aportes acarreados por las corrientes de marea y por la diagénesis de estos materiales. Estos factores contribuyen a la formación de zonas biogeoquímicas distribuidas lateralmente en el área de estudio.

3.3.b. Razones C/N.

El uso de las razones de *carbono y nitrógeno elementales* para identificar fuentes orgánicas presenta limitaciones asociadas a procesos diagenéticos (Prahl y Muehlhausen, 1989) que transforma los valores extremos de materia orgánica terrestre (C/N = 12) y marina (C/N = 6) de acuerdo a la naturaleza del material detrítico (Meyers *et al.*, 1984; Prahl y Muehlhausen, 1989; Hedges, 1992). Los cambios espaciales de la razón C/N en los sedimentos superficiales del delta resultan de la degradación selectiva de carbono y nitrógeno producto de una convergencia de material orgánico marino degradado y material terrígeno antiguo refractario.

Las razones C/N usadas para determinar fuentes orgánicas son especialmente útiles en condiciones donde la distribución espacial es dominada por una mezcla física de la composición de los “miembros terminales” que siguiera un patrón espacial conservativo.

Las estaciones del canal y costa de Baja California presentan valores $\delta^{13}\text{C}$ que indican su origen terrígeno, pero las razones C/N sugieren la importancia de aportes de material orgánico nitrogenado en las estaciones 56, 39 y 26. Es posible que en las estaciones de La Presa y del valle de Mexicali exista una influencia de aportes fitoplanctónicos de agua dulce que produzca un “miembro terminal terrígeno” poco representativo.

Los valores C/N más bajos se encontraron en las zonas con influencia oceánica en la costa de Sonora y área de San Felipe sugiriendo una contribución fitoplanctónica. El amplio intervalo de los valores C/N (7 a 14) se limita al norte de la cuenca estuarina, mientras que el resto de los valores (7.5 a 6.5, típicamente representando influencia marina) se distribuyen en la mayor parte del delta. El gradiente de composición elemental en el

sedimento de la cuenca estuarina indica la influencia de material autóctono por la intrusión de aguas marinas hacia el lecho del río.

En las estaciones de los grupos 1 y 2 en la costa de Sonora, el intervalo de valores C/N varió de 5.8 a 7.2, mientras que el tamaño de grano varió de 3.6 a 2.8 phi con sedimentos más gruesos en las estaciones del grupo 1; asimismo, la razón C/N presentó una relación inversa con el $\delta^{15}\text{N}$; sugiriendo la influencia de nitrógeno de origen marino asociado a los sedimentos más gruesos encontrados en el área de estudio. En las estaciones del grupo 3 (costa de Baja California) la razón C/N mantiene una correlación positiva con el $M\phi$, indicando que el diámetro de las partículas es mayor río arriba, lo que es consistente con altos porcentajes de carbono y $\delta^{13}\text{C}$ negativos. Se han reportado valores C/N aproximadamente de 7 para plancton (Hedges *et al.*, 1986) y un aumento de las razones C/N al aumentar el tamaño de grano en sedimentos deltáicos recientes (Pillon *et al.*, 1986), sin embargo, en la región noreste del delta, la influencia de aguas oceánicas y altas velocidades de corriente residual pueden explicar las bajas razones C/N asociadas a arenas finas.

Prahl *et al.* (1994), en un estudio de los sedimentos de la costa de Washington, encontraron un incremento de razones C/N hacia fuera de la costa; sin embargo, Hedges *et al.* (1997) indicaron una pérdida preferente de nitrógeno respecto al carbono en la materia orgánica del lecho del río inmediatamente después de su descarga.

La determinación de la razón C/N en materia orgánica total puede ser una variable sensible a la alteración diagenética antes y después de su entrada al ambiente marino (Hedges *et al.*, 1997). Esto puede ser muy evidente en ecosistemas con aportes activos de materia terrígena lábil; sin embargo, los valores elementales “marinos” (C/N = ~ 7.5) que se

distribuyen en la mayor parte de la zona de estudio sugieren que en el ecosistema del Colorado, donde los aportes orgánicos terrígenos son presumiblemente “refractarios”, las razones C/N por sí ~~solas~~ son herramientas ~~pobres~~ para resolver los efectos diagenéticos de las aportaciones de las fuentes orgánicas marinas.

Es difícil evaluar adecuadamente los efectos diagenéticos con razones C/N sin el uso de biomarcadores lipídicos (Wakeham y Lee, 1993) e isótopos estables (Hedges, 1992). La distribución C/N frente a $\delta^{13}\text{C}$ del área estudiada es análoga a la reportada por Matson y Brinson (1990) en zonas estuarinas de Carolina del Norte (USA), quienes atribuyeron al reciclamiento del carbono estuarino como la rectoría de los gradientes de composición de la materia orgánica. La determinación de los factores que definen este reciclamiento es un elemento sensible para entender la biogeoquímica del área de estudio.

3.3.c. Isótopos de nitrógeno.

Los isótopos estables de nitrógeno han sido utilizados en estudios tróficos y como trazadores de fuentes orgánicas en ecosistemas costeros (Peters *et al.*, 1978; De Niro y Epstein, 1981; Knowles y Blackburn, 1993). Los cambios en el $\delta^{15}\text{N}$ en sedimentos marinos pueden indicar cambios en la productividad o niveles de nutrientes, pues el fitoplancton sólo discrimina entre ^{14}N y ^{15}N cuando los nutrientes son abundantes (Ostrom *et al.*, 1997). El NO_3^- del agua de mar presenta un $\delta^{15}\text{N}$ de 5 a 7 ‰ (Wada *et al.*, 1975) pero puede tener valores de 18‰ en zonas de denitrificación (Holmes *et al.*, 1996).

La alta sensibilidad del $\delta^{15}\text{N}$ a los procesos diagenéticos causa que los productos del fraccionamiento isotópico sean más pesados que sus precursores (Owens, 1988). Lo anterior indica que es posible utilizar el $\delta^{15}\text{N}$ del seston como un indicador de la transición de la productividad primaria a la regeneración (Owens *et al.*, 1997).

La fijación del nitrógeno atmosférico por bacterias presenta un mínimo fraccionamiento isotópico, lo que resulta en un nitrógeno orgánico con $\delta^{15}\text{N} \approx 0$. Por esto se espera que las plantas terrestres tengan un valor “ligero” (Peters *et al.*, 1978); sin embargo, cuando existen procesos de degradación y contribuciones de diferente origen (incluyendo animales) a una matriz orgánica, el uso de los isótopos de nitrógeno para definir orígenes orgánicos puede presentar problemas de inexactitud (Hedges *et al.*, 1997).

En el delta del río Colorado, los valores de $\delta^{15}\text{N}$ en la matriz orgánica sedimentaria presentaron una distribución espacial compleja. Altos valores de $\delta^{15}\text{N}$ en la costa de Sonora y en la zona de las estaciones 10 (14.2‰), 37 (15‰) y 38 (11.5‰). Estos resultados son consistentes con los valores de $\delta^{13}\text{C}$ ($\sim -19.6\text{‰}$) y de la razón C/N (~ 6.2) de estas mismas estaciones, donde se ha encontrado influencia de aportes fitoplanctónicos. Wada *et al.* (1987) reportaron valores $\delta^{15}\text{N}$ de 6-10‰ para materia orgánica marina; sin embargo, los altos valores de $\delta^{15}\text{N}$ en estas estaciones sugieren la influencia de procesos de degradación de la materia orgánica. Durante la denitrificación, el ciclo microbiano preferentemente reduce el ^{14}N del NO_3^- enriqueciendo de ^{15}N el nitrato no utilizado durante el proceso (Holmes *et al.*, 1996; Ostrom *et al.*, 1997).

Los altos valores de $\delta^{15}\text{N}$ ($9.2 \pm 3.3\%$) de este estudio sugieren que existe una intensa actividad microbiana que aporta NO_3^- enriquecido en ^{15}N . Este nitrato estaría disponible para la producción primaria, generando material orgánico particulado con altos valores de $\delta^{15}\text{N}$, lo que finalmente se reflejaría en el material orgánico sedimentario del delta. Francois *et al.* (1992) reportaron en estudios de núcleos del océano Índico, que los procesos diagenéticos en la interfase sedimento-agua pueden causar un enriquecimiento en ^{15}N de 5 a 7%.

Por otro lado, las estaciones 13, 8 y 6 presentan valores de $\delta^{15}\text{N}$ muy bajos ($\approx 2.7\%$), que indicarían aportes orgánicos con influencia terrígena (Peters *et al.*, 1978), o procesos de nitrificación (Ostrom *et al.*, 1997), mientras que las mismas estaciones presentan valores de $\delta^{13}\text{C}$ (≈ -19.4) típicos de material fitoplanctónico (Fry y Sherr, 1984). Holmes *et al.* (1996) reportaron un valor $\delta^{15}\text{N}$ de 7.04‰ para una estación con influencia de material terrígeno ($\delta^{13}\text{C} = -26.43\%$), nuestro resultado de $\delta^{15}\text{N}$ para el suelo agrícola del valle de Mexicali es de 5.8‰ ($\delta^{13}\text{C} = -23.8\%$). La estación 13 está situada frente al estero La Ramada con influencia de pastizales. Zieman *et al.* (1984) reportaron para el pasto marino *Thalassia* sp. valores $\delta^{15}\text{N}$ entre 4.6‰ y 2.7‰. Sin embargo, es posible que en estas estaciones haya aguas suficientemente oxigenadas para generar un proceso de nitrificación en la materia orgánica sedimentaria. Ostrom *et al.* (1997), en un estudio estacional de un ambiente costero caracterizado por fuertes variaciones físicas y biológicas, encontraron que los bajos valores de $\delta^{15}\text{N}$ en las trampas de sedimentos pueden ser originados por aportes sustantivos de células fitoplanctónicas grandes que tienen una dependencia mayor con los nitratos que con otra especie nitrogenada regenerada.

En las zonas oceánicas de las costas de Sonora (grupo 1) y de Baja California (grupo 4) los resultados de $\delta^{15}\text{N}$ promedio fueron 8.2‰ y 8.5‰ respectivamente, mientras que para las zonas estuarina de la costa de Sonora (grupo 2) y costa de B. C. (grupo 3) los resultados de $\delta^{15}\text{N}$ promedio fueron 10.9‰ y 10.3‰ respectivamente. Ostrom *et al.* (1997) reportaron un $\delta^{15}\text{N} = 8.5‰$ para materia orgánica particulada en sedimentos superficiales oceánicos. Estos resultados sugieren que en las zonas biogeoquímicas con mayor influencia oceánica ocurren procesos de mineralización, mientras que en la zona cercana a la cuenca estuarina los procesos de denitrificación aparentemente influyen el $\delta^{15}\text{N}$ sedimentario de una manera importante.

Las condiciones ambientales definidas por el patrón de circulación y la presencia de biomarcadores lipídicos como los ácidos grasos monoinsaturados y saturados menores de 20 carbonos (capítulo 5 de esta tesis), indican la presencia de aguas oxigenadas que pudieran favorecer un efecto isotópico de nitrificación en los sedimentos en la costa de Sonora.

Por otro lado, valores altos (10 a 12‰) de $\delta^{15}\text{N}$ en seston sugieren la influencia de procesos que involucra pérdidas de Amonio y nitrógeno orgánico disuelto, pastoreo de micro-zooplankton, hidrólisis de proteínas y degradación microbiana (Ostrom *et al.*, 1997). Si consideramos que el efecto de la diagénesis es básicamente un enriquecimiento selectivo de ^{15}N , que genera un $\delta^{15}\text{N}$ “marino” (Knowles y Blackburn, 1993), nuestros valores reflejarían una alteración biogénica más que un índice de procedencia.

3.4. Conclusiones.

La variación espacial de la composición orgánica en la matriz sedimentaria en el delta del Colorado, aparentemente sigue el patrón de circulación regido por las mareas, que aporta y distribuye materiales de diferentes orígenes. Sin embargo, considerar sólo los procesos físico-hidrológicos resulta incompleto para explicar la composición de la materia orgánica en la escala espacial. Los resultados indican que la mezcla y remineralización de la materia orgánica son elementos activos que contribuyen a definir zonas biogeoquímicas dentro de este ecosistema.

La caracterización biogeoquímica de la materia orgánica sedimentaria presentó cuatro zonas estadísticamente diferentes. Los grupos de estaciones 1 y 2 que definen la influencia del aporte de aguas oceánicas por la costa de Sonora presentaron un gradiente de sur a norte que se incrementa a valores promedio menos negativos de $\delta^{13}\text{C}$ (-20.3‰ a -19.7‰), de $\delta^{15}\text{N}$ (8.2‰ a 10.9‰), de razón C/N (6.6 a 7.5) y mayores tamaños de grano medio (3.7 a 2.8 phi). La materia orgánica, que se registra en estos sedimentos de arenas finas, indica un aumento de aportes fitoplanctónicos y sugiere que los nitratos disponibles para la productividad primaria están enriquecidos con ^{15}N .

La influencia de la descarga de la cuenca estuarina comprende los grupos de estaciones 3 y 4, por la costa de Baja California. La caracterización isotópica y elemental presentó un gradiente de norte a sur con valores menos negativos de $\delta^{13}\text{C}$ (-22.1‰ a -20.8‰), menos positivos de $\delta^{15}\text{N}$ (10.5‰ a 8.5‰) y de razón C/N (11.3 a 6.8) y menores tamaños de grano medio (4.7 a 6.8 phi). Los aportes limo-arcillosos del depósito deltáico no parecen contener una composición orgánica enriquecida con ^{12}C . El material orgánico terrígeno refractario debe mezclarse con el material autóctono, que incluiría fitoplancton y

organismos heterótrofos. Sin embargo, la discriminación estadística de estas zonas, directamente influenciadas por la descarga estuarina, indica que ocurren procesos biogeoquímicos diferentes a los de la costa de Sonora.

En un ecosistema sin aportes orgánicos terrígenos lábiles, la composición orgánica de los sedimentos cambia principalmente por aportes orgánicos marinos o por procesos diagenéticos que resultan en una matriz enriquecida en ^{13}C . Los valores “positivos” del $\delta^{13}\text{C}$ y los bajos valores de la razón C/N de la mayor parte de los sedimentos deltáicos sugieren que los aportes orgánicos de material particulado, provenientes del depósito deltáico son enmascarados por los aportes orgánicos autóctonos. El cambio en los valores de $\delta^{15}\text{N}$ del grupo 3 al grupo 4 sugiere que, en la cuenca estuarina, los procesos de denitrificación son mayores que hacia el área de la plataforma oceánica por la costa de Baja California.

La identificación de las fuentes y patrones de mezcla en el área de estudio fundamenta que el material orgánico terrígeno, proveniente de la cuenca estuarina, y el material orgánico marino, son elementos que determinan las características biogeoquímicas de la materia orgánica sedimentaria en el ecosistema del delta del río Colorado.

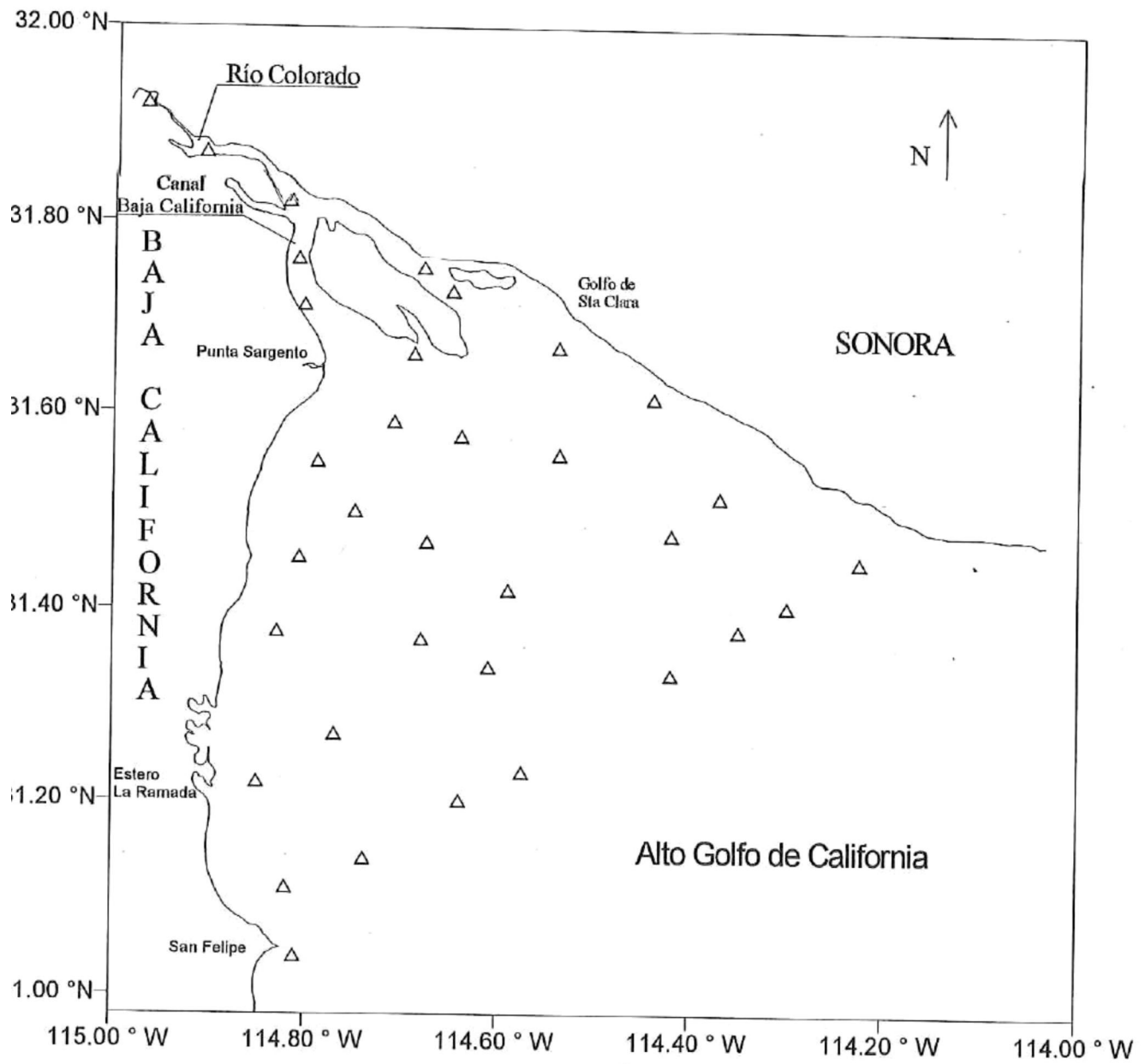


Figura 3.1. Estaciones de muestreo de sedimento superficial para determinar isótopos estables de carbono y nitrógeno en el delta del río Colorado.

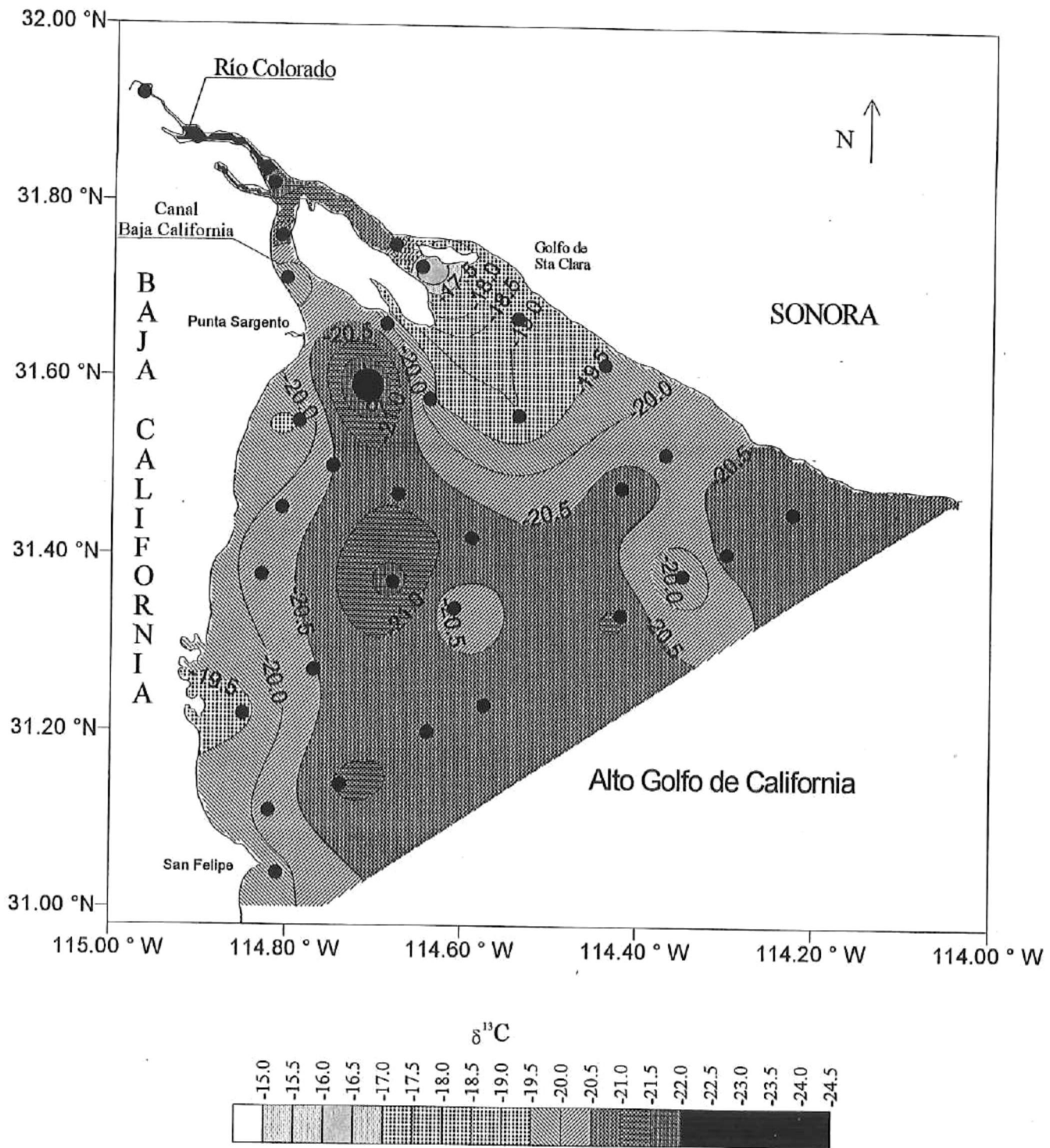


Figura 3.2. Iso líneas de $\delta^{13}\text{C}$ en sedimentos superficiales del delta del Colorado. Los puntos negros indican las estaciones de muestreo.

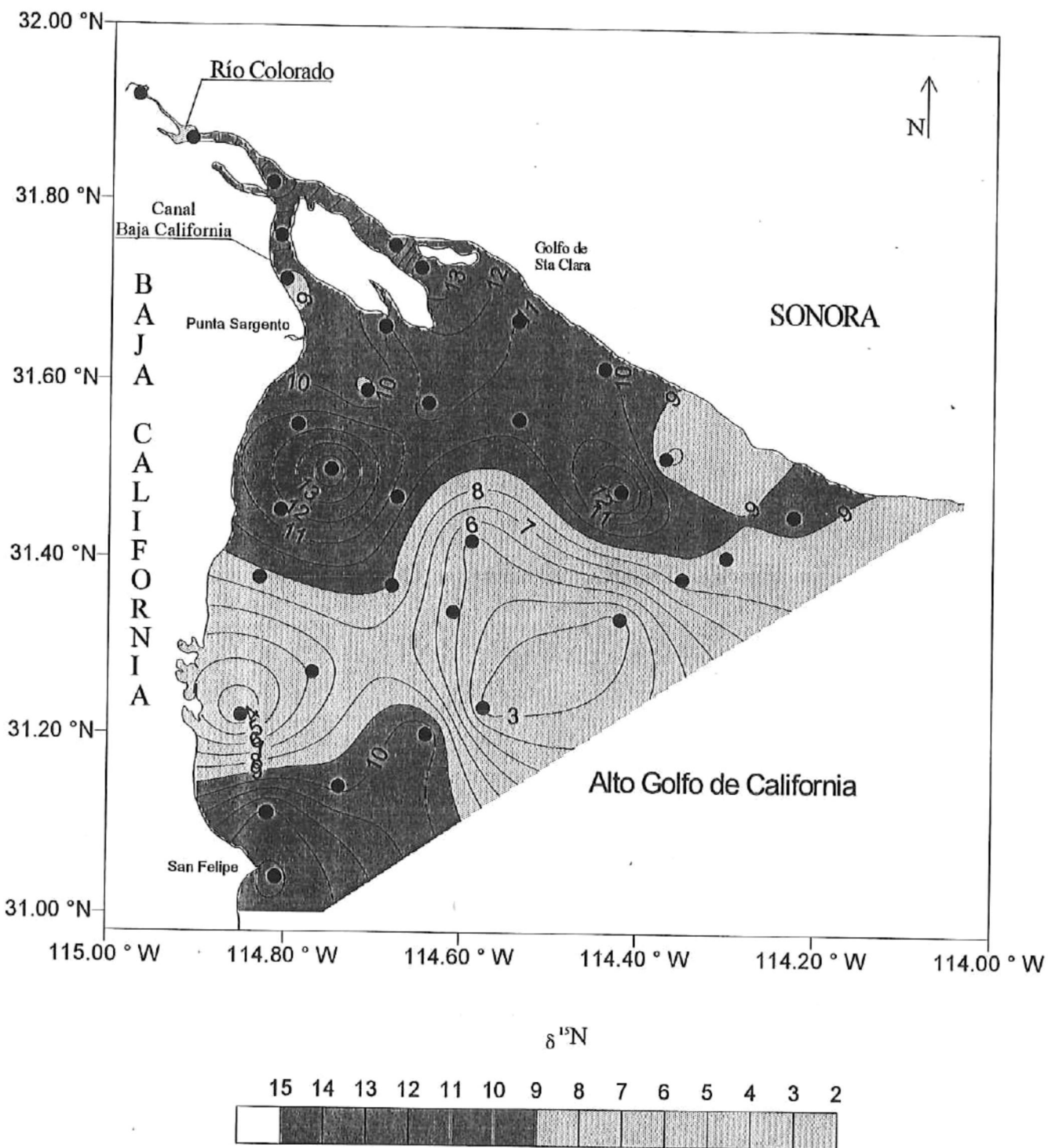


Figura 3.3. Isolíneas de $\delta^{15}\text{N}$ en sedimentos superficiales del delta del Colorado. Los puntos negros indican las estaciones de muestreo.

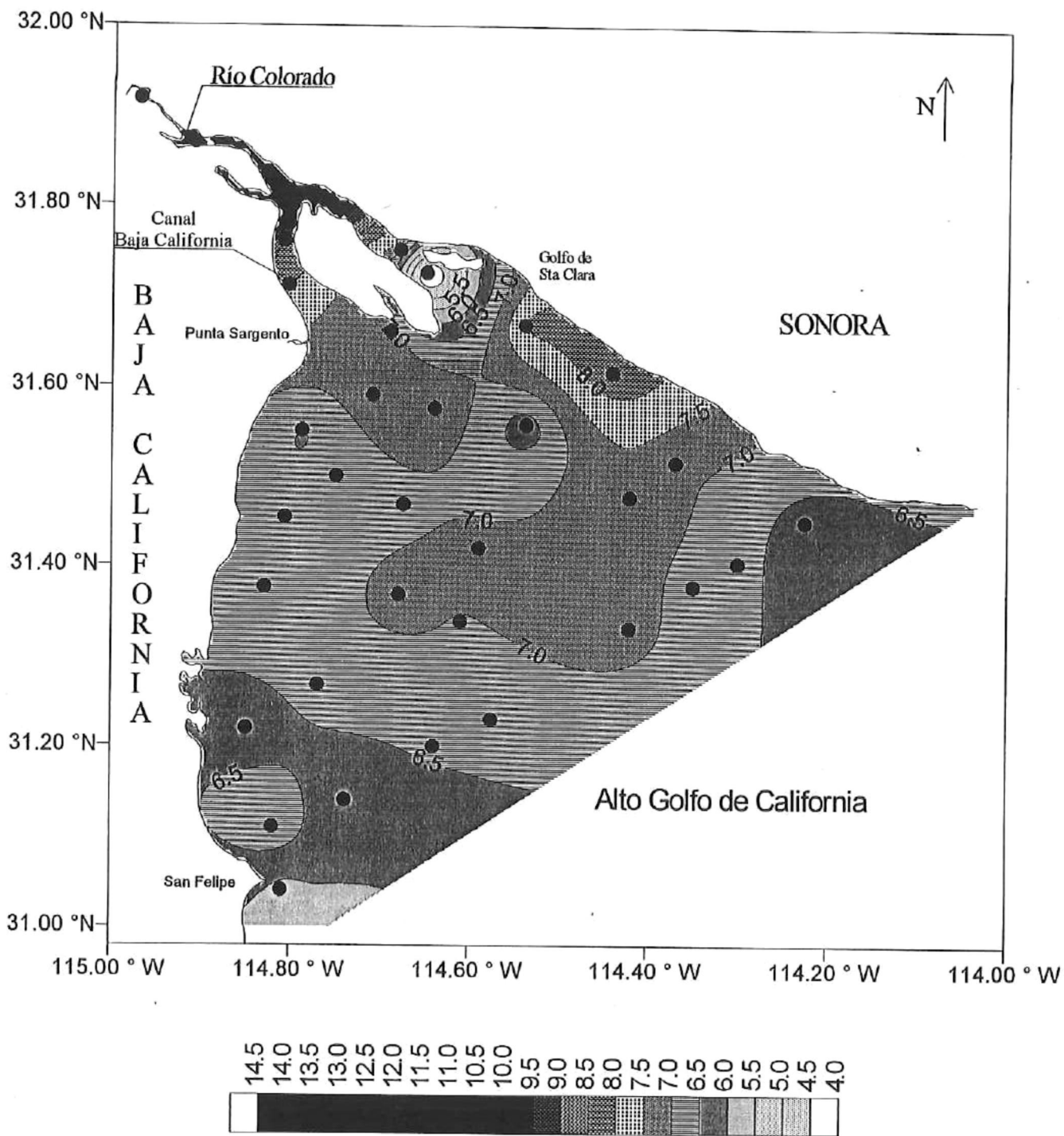


Figura 3.4. Isolíneas de razones C/N en sedimentos superficiales del delta del río Colorado. Los puntos negros indican las estaciones de muestreo.

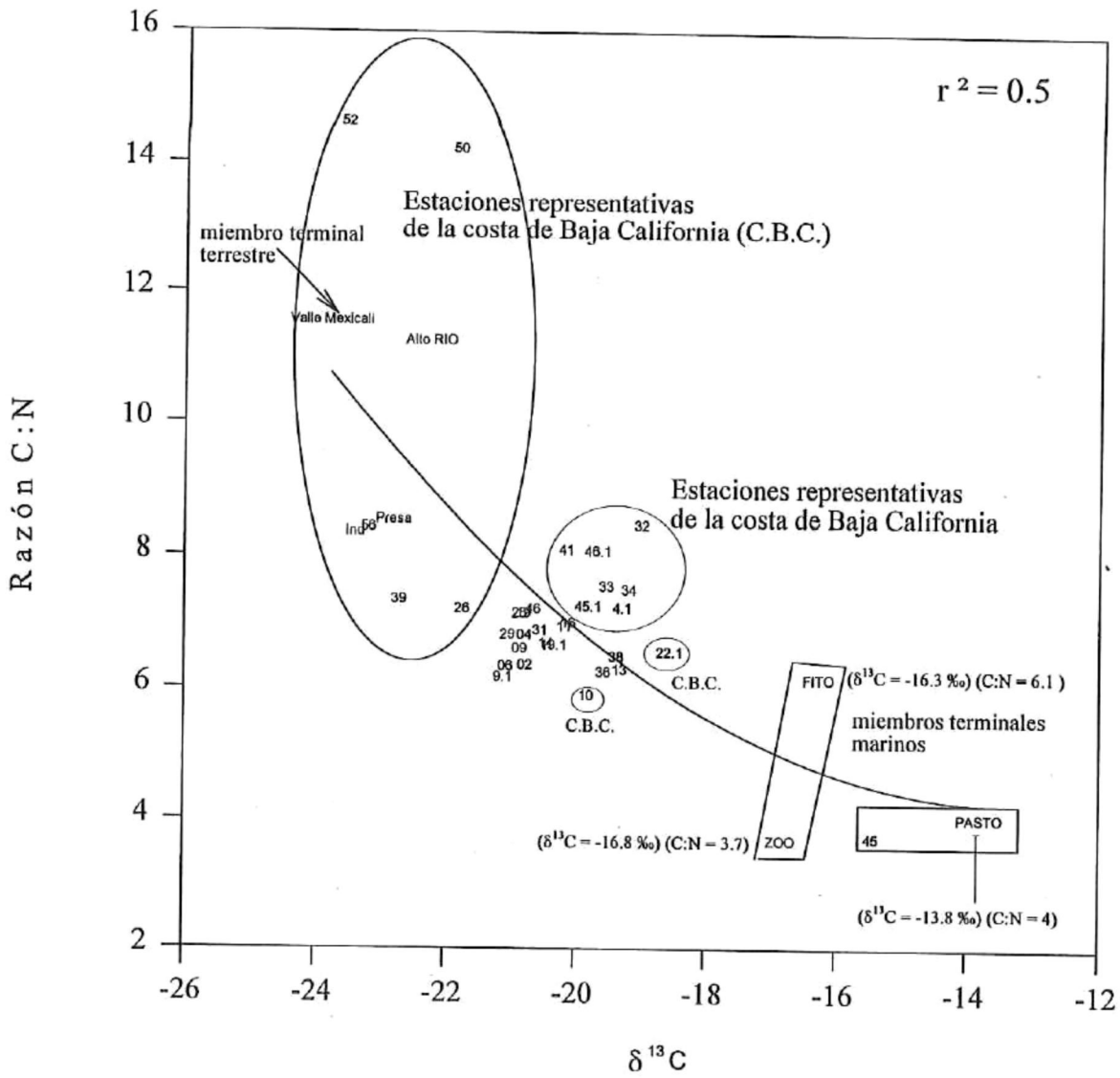


Figura 3.5. Relación de la razón C/N vs. $\delta^{13}\text{C}$ en sedimentos superficiales en el delta del río Colorado.

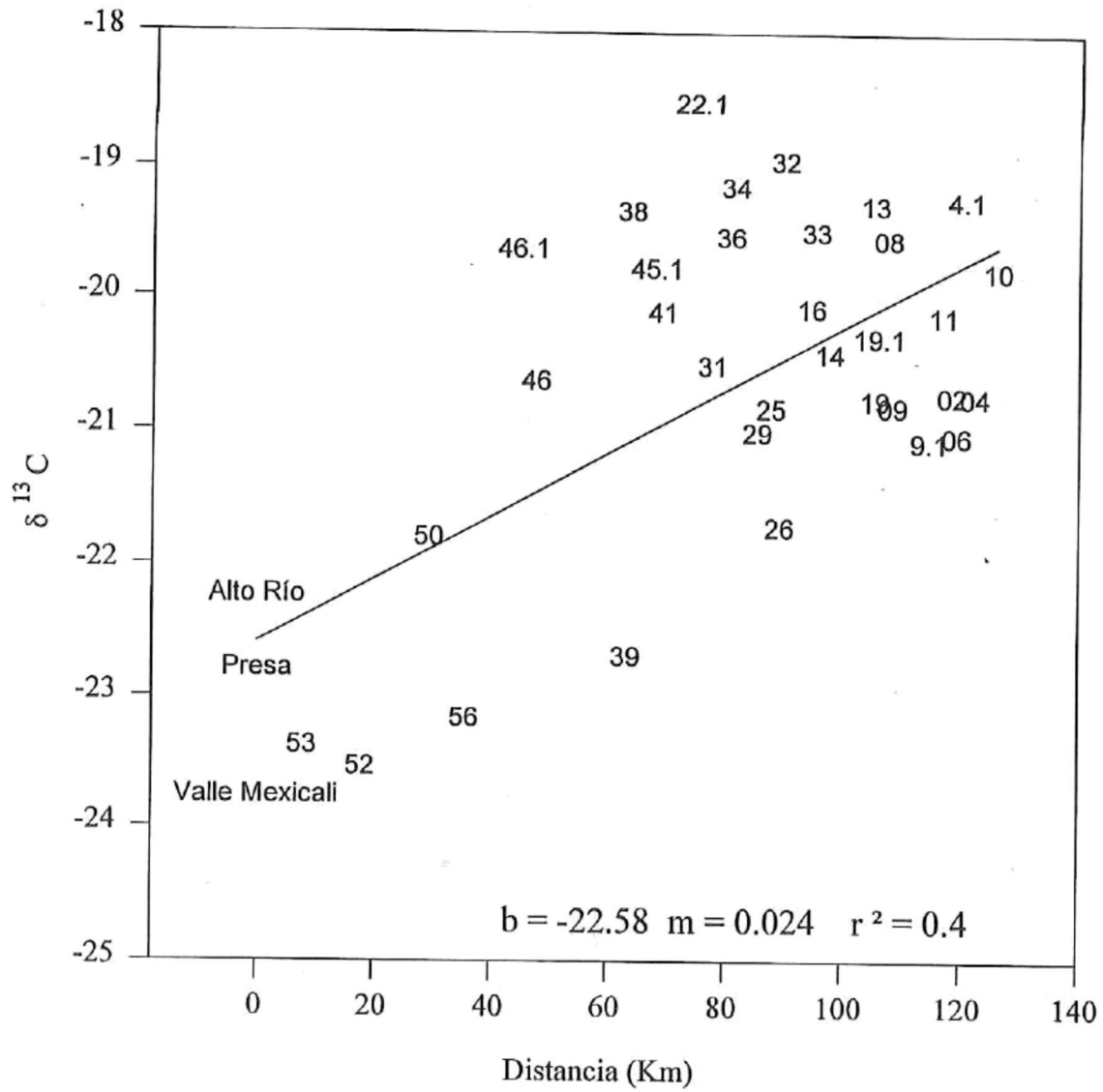


Figura 3.6. Relación $\delta^{13}C$ en sedimentos superficiales vs. distancia (Km) en sedimentos superficiales del delta del río Colorado.

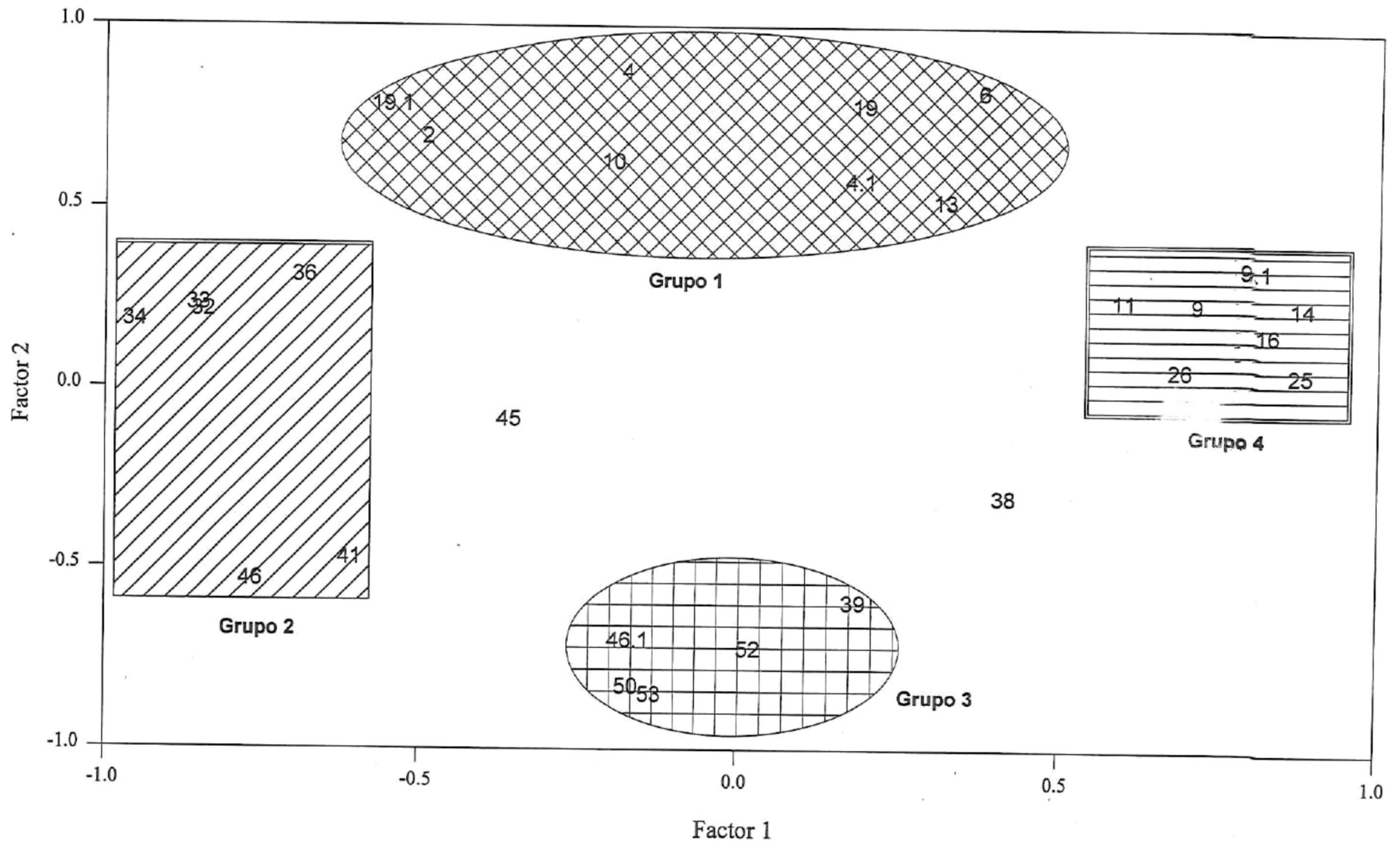


Figura 3.7. Relación de las cargas del factor 1 vs. factor 2 que muestra los grupos de estaciones determinados por análisis factorial (modo-Q), en el delta del río Colorado.

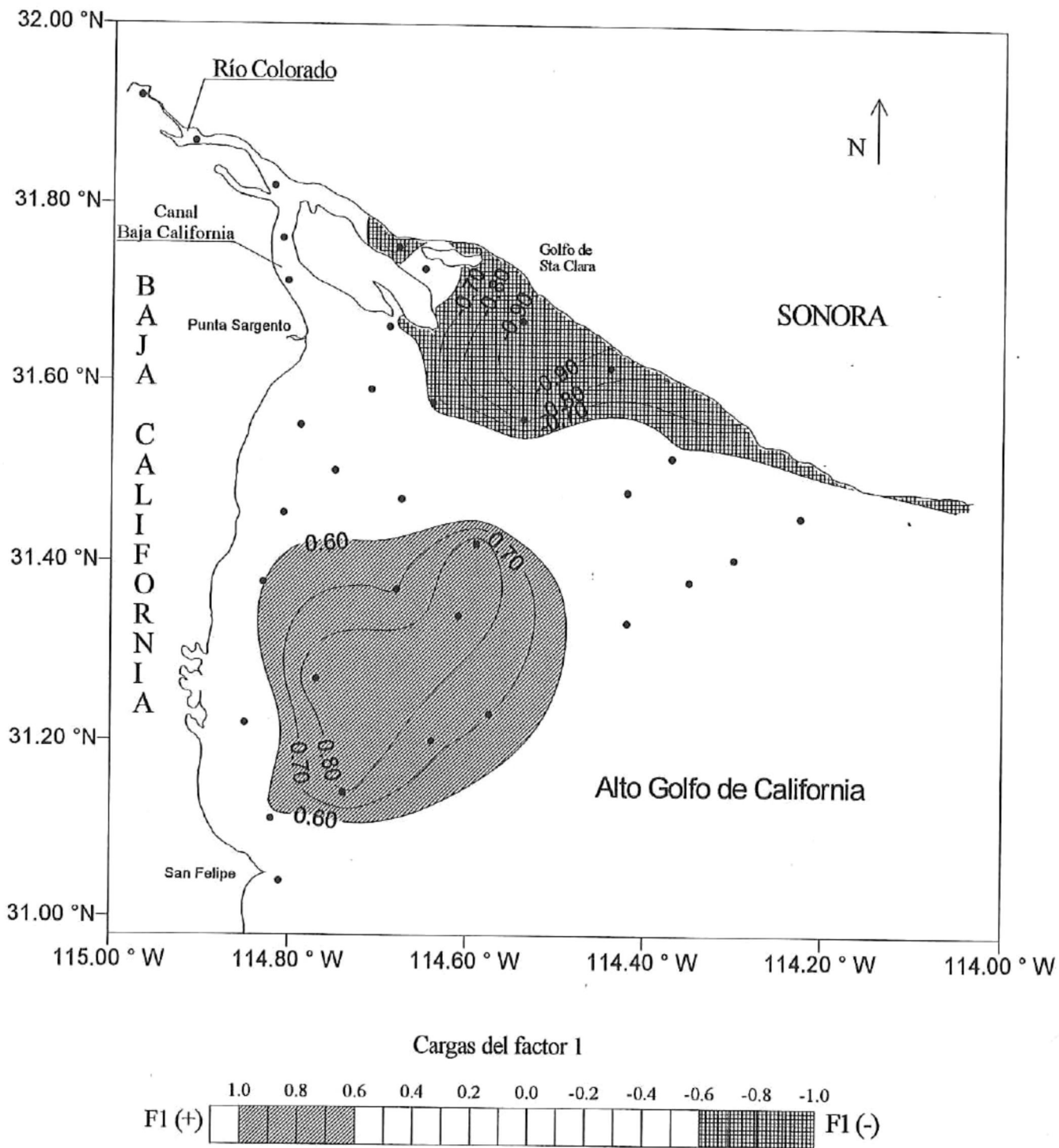


Figura 3.8. Isolíneas de las cargas del factor I que muestra los agrupaciones de las estaciones en el delta del río Colorado. Los puntos negros indican las estaciones muestreadas.

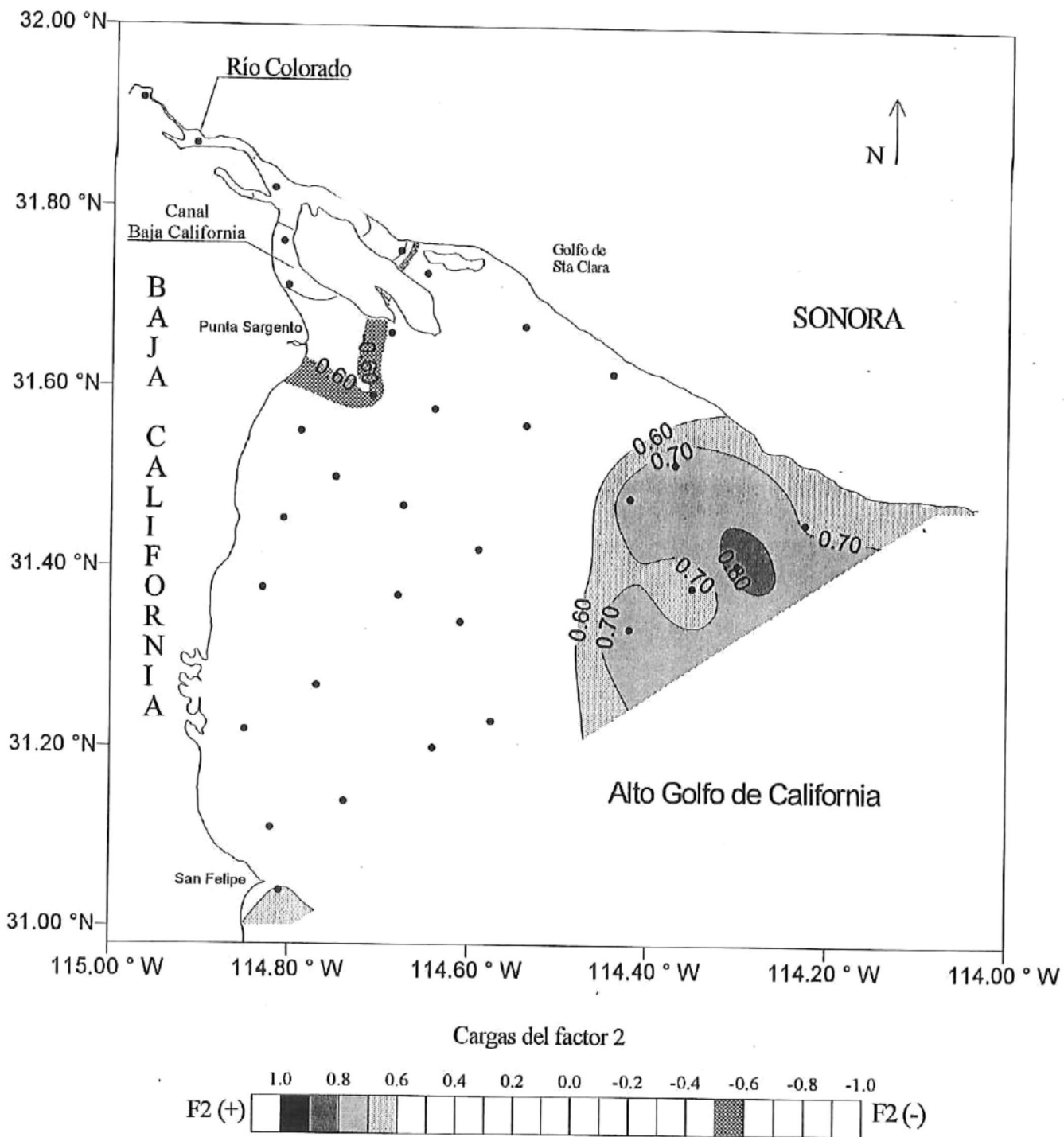


Figura 3.9. Isolíneas de las cargas del factor 2 que muestra los agrupaciones de las estaciones en el delta del río Colorado. Los puntos negros indican las estaciones muestreadas.

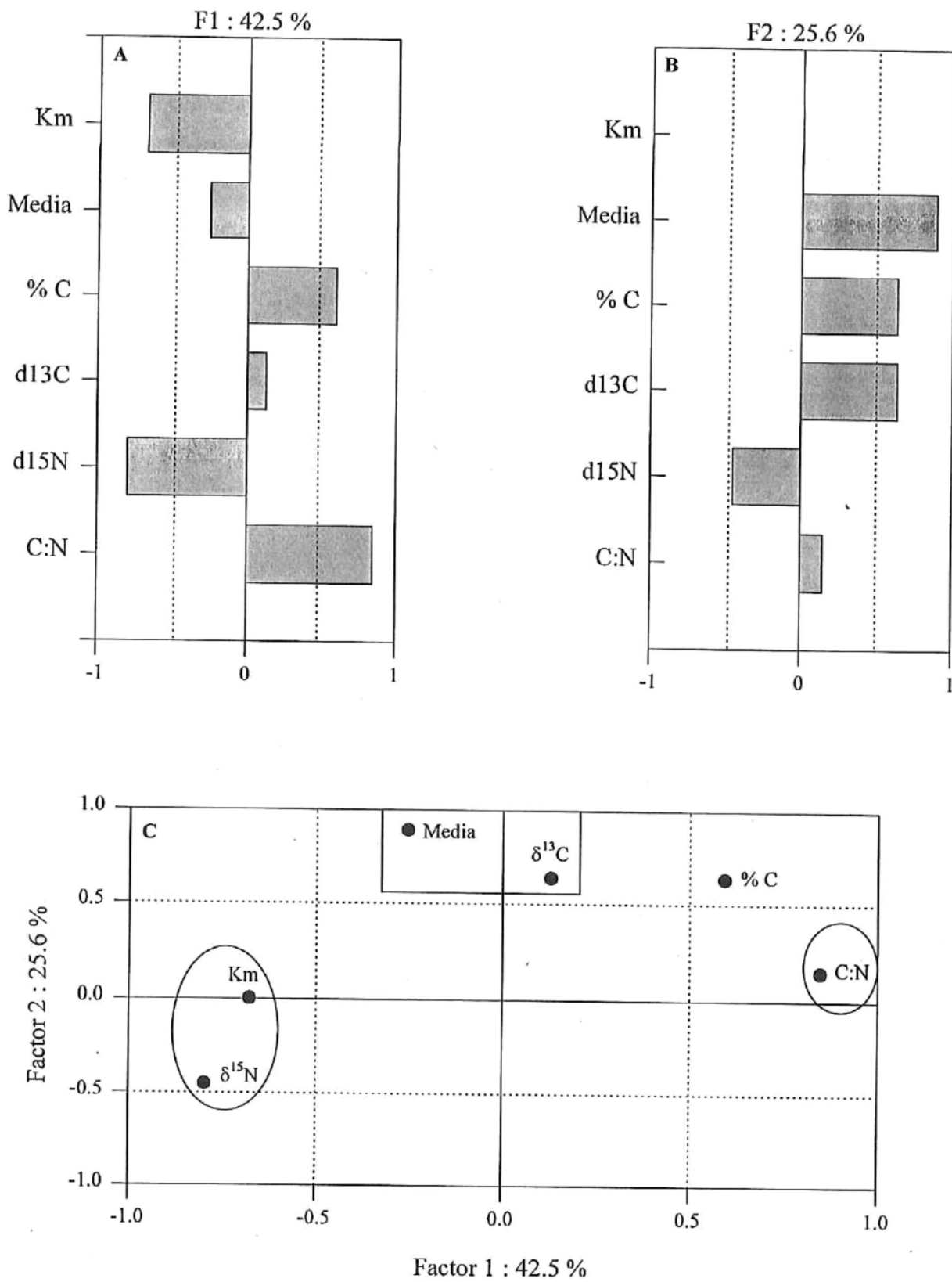


Figura 3.10. Representación esquemática de las cargas de los factores y su porcentaje de variabilidad para el grupo 1.

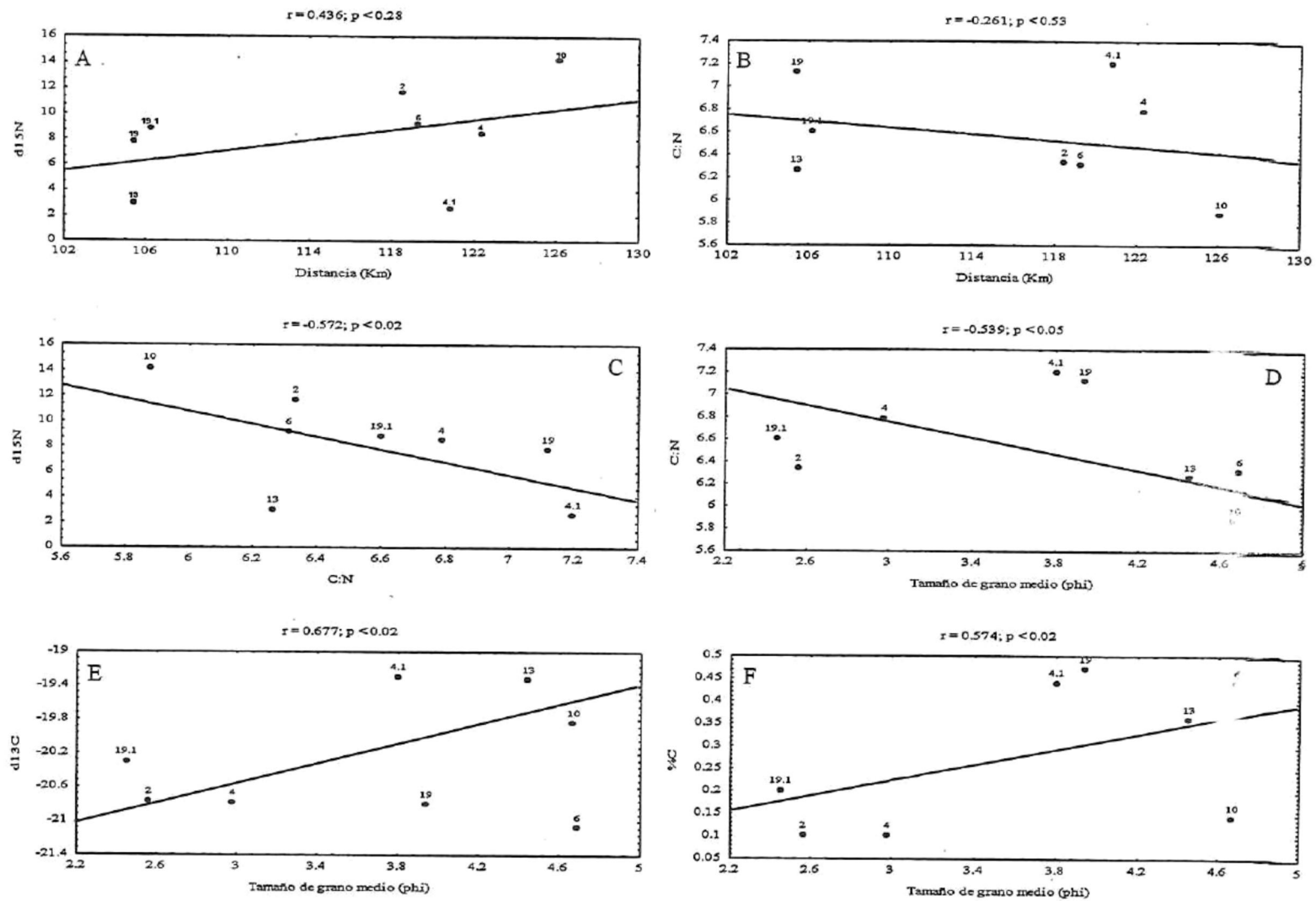


Figura 3.11. Análisis de regresión lineal de las variables del grupo 1.

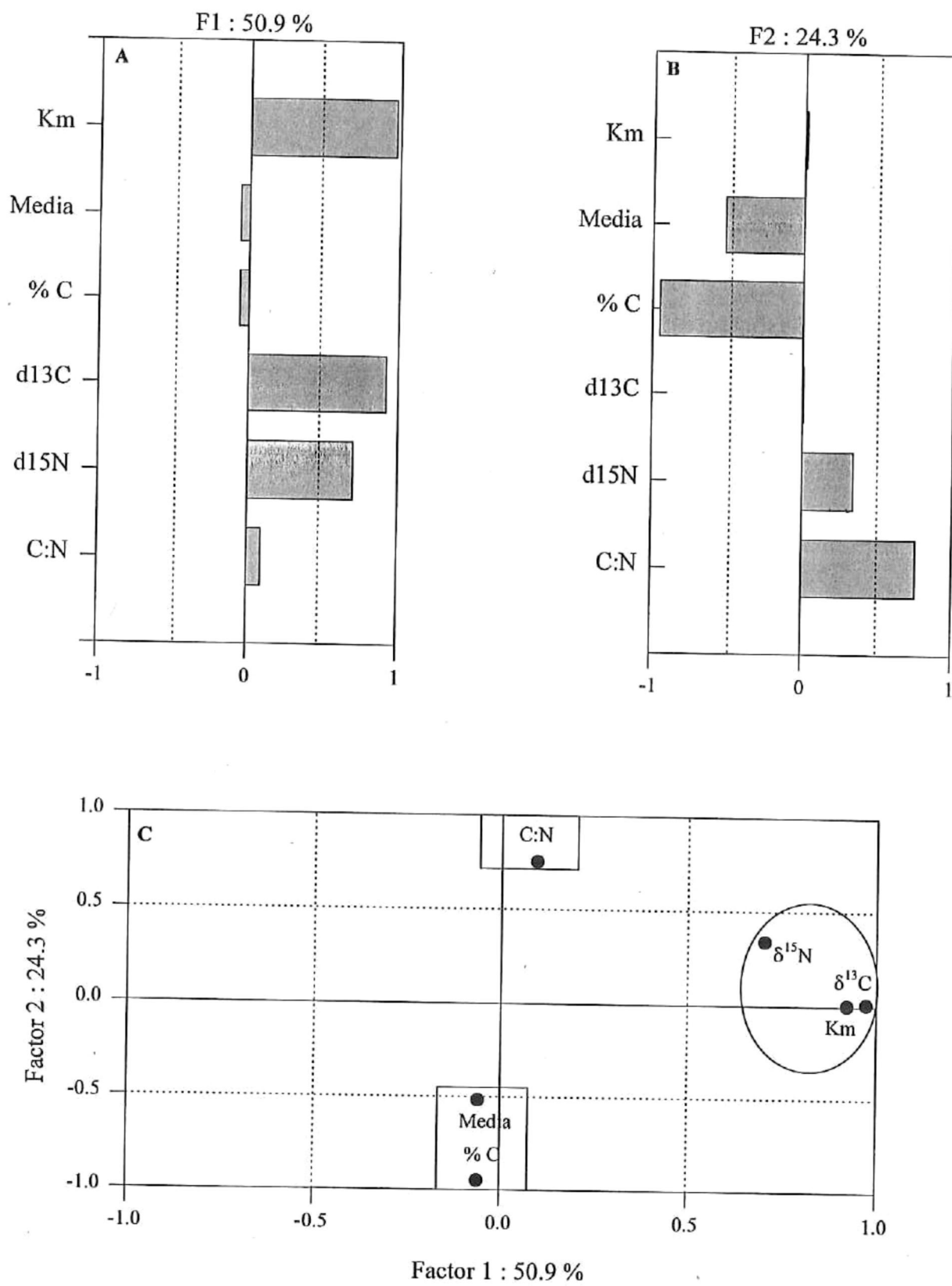


Figura 3.12. Representación esquemática de las cargas de los factores y su porcentaje de variabilidad para el grupo 2.

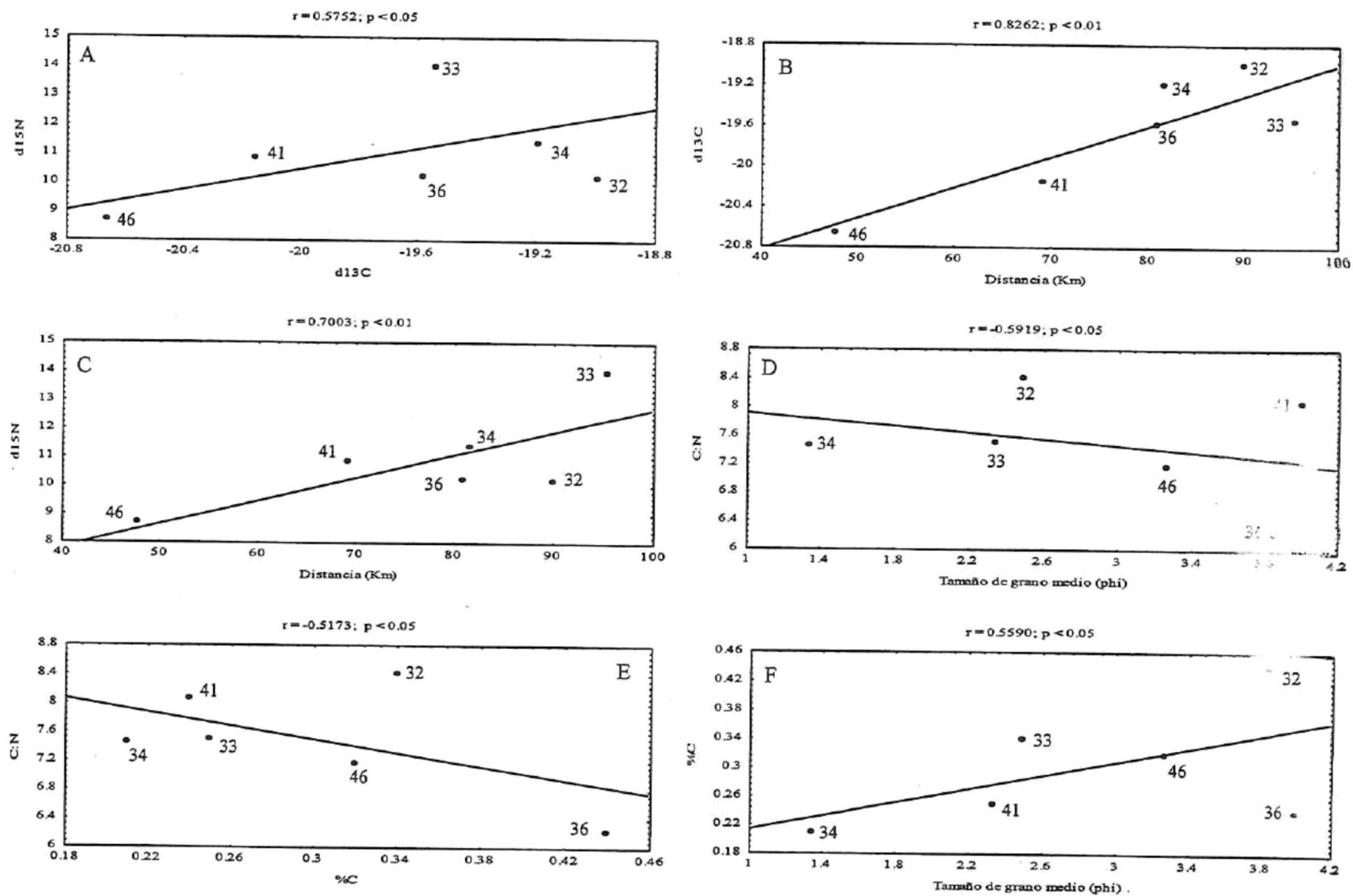


Figura 3.13. Análisis de regresión lineal de las variables del grupo 2.

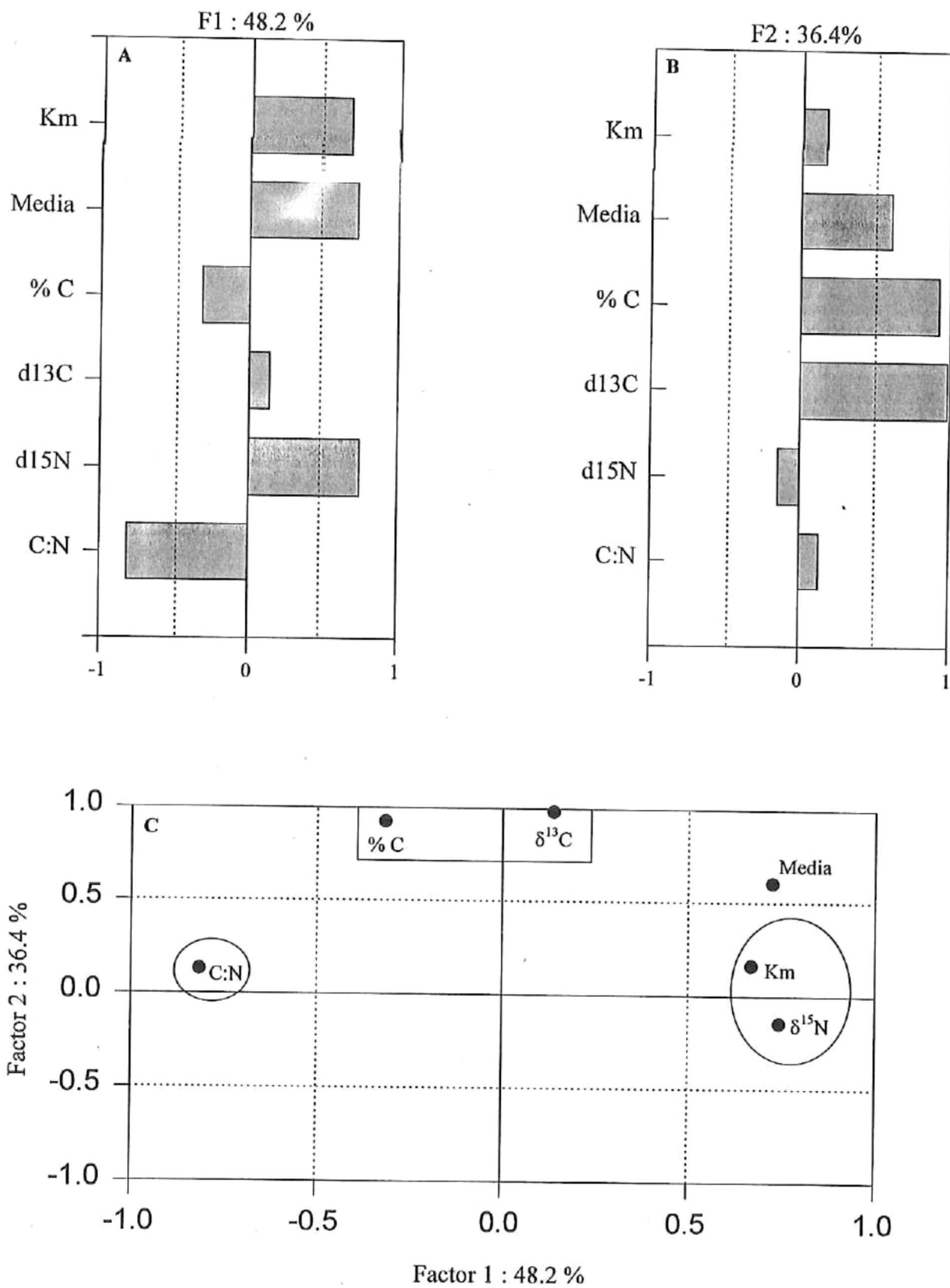


Figura 3.14. Representación esquemática de las cargas de los factores y su porcentaje de variación para el grupo 3.

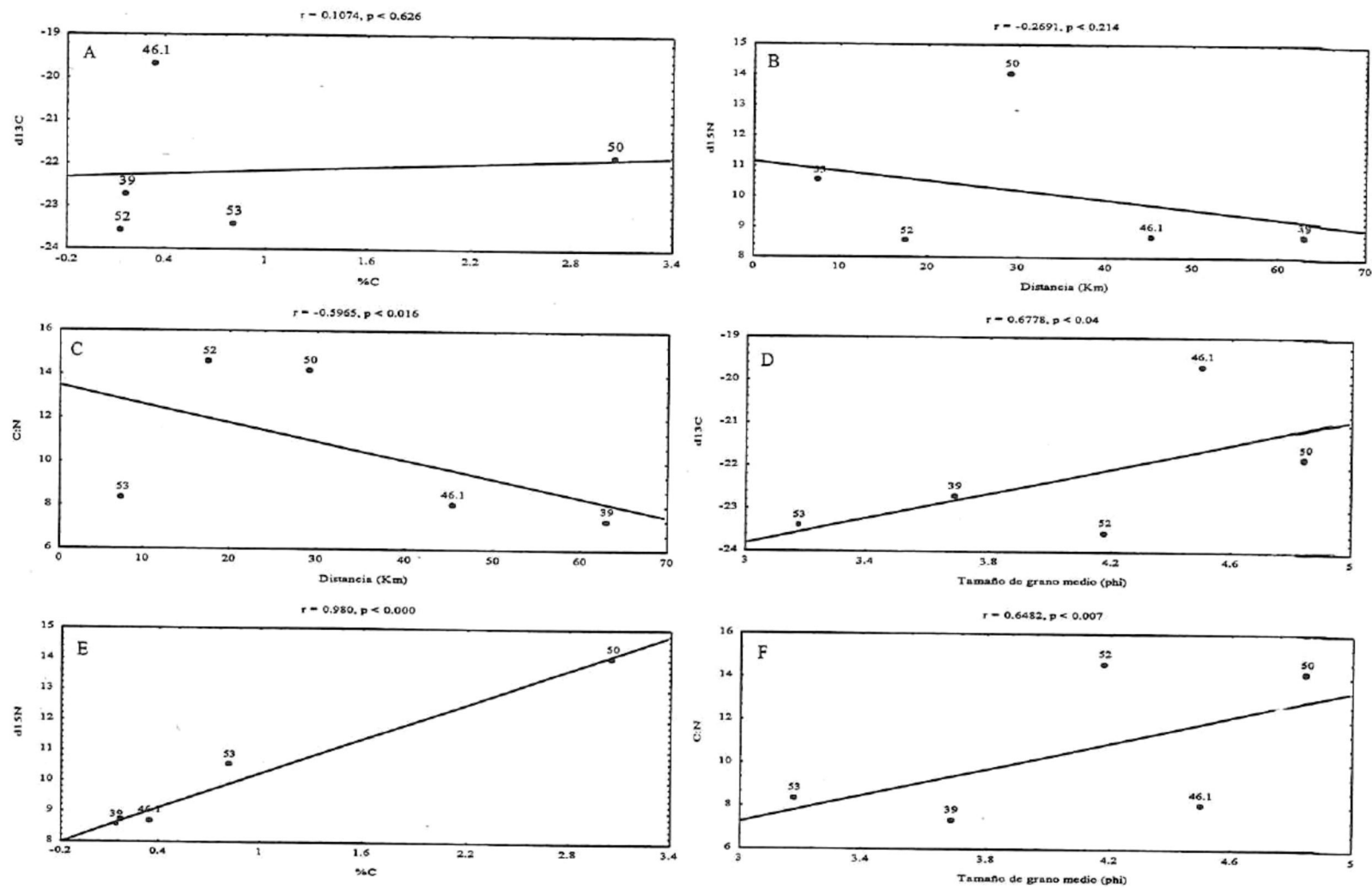


Figura 3.15. Análisis de regresión lineal de las variables del grupo 3.

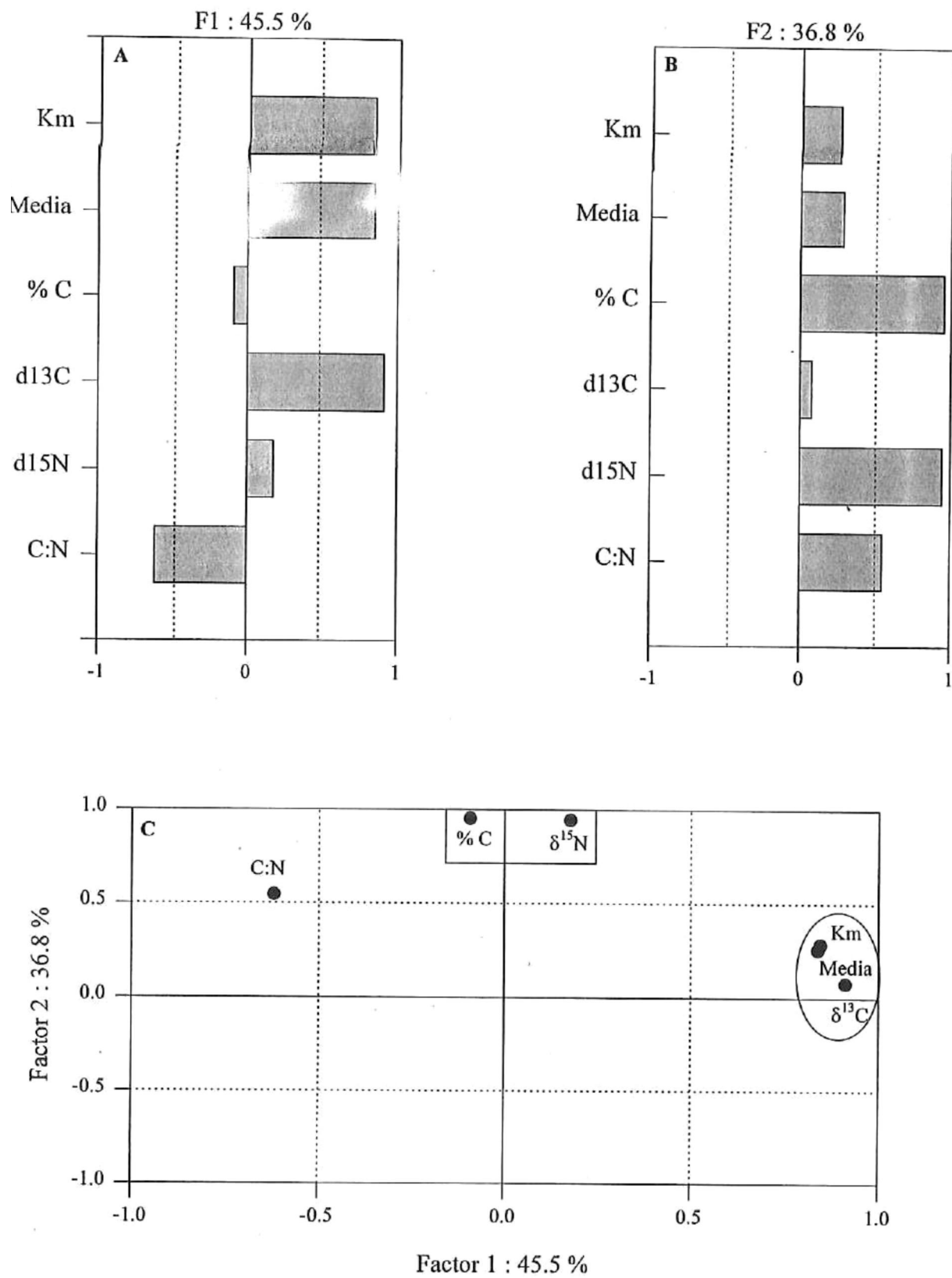


Figura 3.16. Representación esquemática de las cargas de los factores y su porcentaje de variación para el grupo 4.

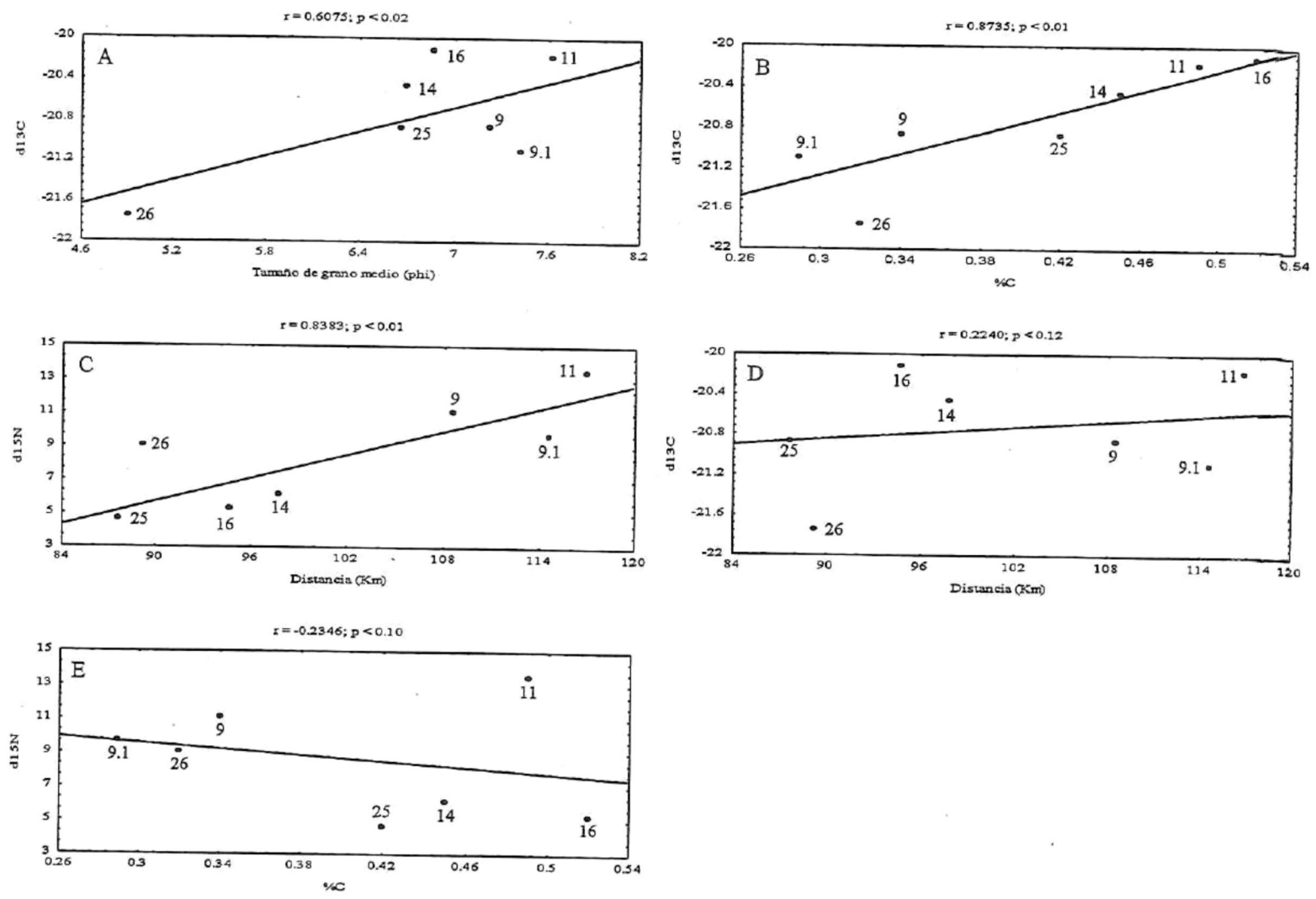


Figura 3.17. Análisis de regresión lineal para las variables del grupo 4.

CAPÍTULO 4. ÁCIDOS GRASOS EN SEDIMENTOS SUPERFICIALES DEL DELTA DEL RÍO COLORADO.

4.1. Ácidos grasos en materia orgánica sedimentaria

La composición orgánica de material particulado en el océano presenta una estructura molecular compleja y espacialmente heterogénea como resultado de las interacciones de la biota y del reservorio de materia orgánica disponible (Canuel *et al.*, 1995; Azam, 1998). En las zonas costeras, las variaciones en las tasas de sedimentación, los aportes y diagénesis de los aportes orgánicos terrígenos y marinos, son importantes factores que influyen la composición molecular de la materia orgánica que se registra en el sedimento (Jorgensen *et al.*, 1990; Cowie y Hedges, 1991; Sun *et al.*, 1997).

Los ácidos grasos representan del 17 al 37% del carbono orgánico total que se registra en aguas oceánicas superficiales (Colombo *et al.*, 1997) y comprenden sólo el 1% del 20% de la materia orgánica que efectivamente llega a los sedimentos del océano profundo (Wakeham *et al.*, 1997). La importancia de los ácidos grasos en los procesos metabólicos los convierte en valiosos trazadores de la biogeoquímica de la materia orgánica particulada (Wakeham *et al.*, 1984).

Para evaluar las variaciones de los tipos de ácidos grasos que ocurren en las diferentes condiciones hidrodinámicas en el delta del Colorado, se presenta el análisis estadístico de los ácidos grasos detectados en la matriz orgánica sedimentaria total. Se determinó la composición y tipo de organismos que contribuyen al material orgánico autóctono y alóctono que se registra espacialmente. Se discuten estas diferencias de composición en las zonas estadísticamente diferentes encontradas en el área de estudio.

4.2. Resultados.

Las concentraciones de los ácidos grasos totales (AGT) y del carbono orgánico total (COT) de los sedimentos superficiales del delta del río Colorado variaron entre 7 y 47 $\mu\text{g/g}$ de sedimento seco y de 0.2 a 0.5%, respectivamente (Tabla 4.1). La distribución espacial de la concentración de los AGT normalizados por COT muestra valores más altos hacia la costa de Baja California (Figura 4.2). El patrón de distribución espacial del COT presentó máximos hacia la parte suroeste del área de estudio (Figura 4.3).

En los sedimentos superficiales de la cuenca estuaria se encontraron un total de 37 ácidos grasos (AG). Los AG con mayor abundancia relativa fueron: C16:1w7 (0.8 a 16.7%), C16 (10.9 a 31.6%), C18:1w9 (5.3 a 19%), C18:1w7 (1.3 a 11.5%); y los de menor abundancia fueron: C13:P1 (0.1 a 1%), C18:4 (0.1 a 0.8%), C18:3 (0.3 a 1.6%), C20:3P1 (0.2 a 1%), C21 (0.2 a 1.2%), C22:P5 (0.1 a 1.1%), C22:1w11 (0.1 a 0.7%) y C23 (0.2 a 1.3%).

4.2.a. Análisis estadístico multivariado de ácidos grasos.

Análisis de grupos en modo R.

El análisis multivariado de datos biogeoquímicos ha sido utilizado para caracterizar la materia orgánica del material particulado y los sedimentos marinos (Colombo *et al.*, 1997; Davis, 1986; Chávez-Vargas, 1997). Las fuentes de materia orgánica en el delta del Colorado fueron caracterizadas mediante análisis estadístico multivariado, a partir de una matriz de 37 AG utilizados como biomarcadores específicos. Se realizó un análisis de grupos en modo R (37 AG x 16 estaciones) y del dendrograma

resultante se obtuvieron 4 grupos con un nivel de similitud superior a 60. Los grupos identificados fueron: Fitoplancton A, Bacterias, Fitoplancton B y Terrígenos (Figura 4.4).

El grupo *Fitoplancton A* incluyó 4 AG saturados, 2 de cadena larga (> C20 y C21) y 2 de cadena corta (< C14 y C16), 2 poli-insaturados de 18 carbonos (C18:2, C18:4) y un monoinsaturado (C16:1w7). El grupo *Bacterias* se caracterizó por 3 AG iso-ramificados de 15, 16 y 17 carbonos, 2 anteiso-ramificados de 15 y 17 carbonos, un poli-insaturado de 18 carbonos (C18:3), 3 monoinsaturados (C16:1w9, C16:1wE, C18:1w7), 1 ramificado (10Me16:0) y un poli-insaturado de 17 carbonos (C17:1). El grupo *Fitoplancton B* (AG-POLINSAT) se identificó por 5 ácidos poli-insaturados de 20 y 22 carbonos (C20:4; C20:5, C20:3P1, C20:3P2, C22P1 y C22P5) y 2 monoinsaturados C20:1w11 y C22:1w11. El grupo terrígeno representó a los AG de cadena larga, con 22 o más carbonos (C22, C23, C24, C25, C26, C28, C30, C32).

Los grupos de ácidos grasos identificados fueron sometidos a una prueba de análisis discriminante multivariado (ADM) para probar si son significativamente diferentes (Tabla 4.3). A partir de la comparación de la D^2 de Mahalanobi (que es una medida de la separación de los grupos) se calculó una F de Snedecor para cada fuente. La F calculada y el nivel de significación ($p < 0.05$) indican que las fuentes son significativamente diferentes entre sí. El análisis canónico, obtenido del ADM, muestra que con solo las dos primeras funciones canónicas se pudo identificar la separación de las fuentes, ya que contribuyen 98% a la discriminación (Tabla 4.4). Esto hace posible mostrar una gráfica bidimensional de los AG que caracterizan a cada fuente (Figura 4.5).

Análisis de grupo en modo Q.

Para identificar un patrón de distribución espacial de las fuentes orgánicas definidas por los ácidos grasos, se generó una matriz de 16 estaciones por 37 AG. El dendrograma en modo Q muestra 3 grupos definidos (Figura 4.6). La distribución espacial de los grupos es mostrada en la figura 4.7.

El grupo 1 incluyó 4 estaciones (16, 17, 25 y 46.1). Las tres primeras estaciones se localizan en la parte media del Alto Golfo de California y la 46.1 en el canal Baja California (Figura 4.7).

Las estaciones 4.1, 32, 33, 38 y 45.1 componen al grupo 2. Éste se localiza principalmente a lo largo de la costa sonorensis y se extiende al sur del canal Baja California. El grupo 3, comprende la margen media y oeste del Norte del Golfo de California y está representado por las estaciones 4, 7, 8, 9.1, 13, 14 y 36.

Para probar si los grupos de estaciones fueron separados correctamente en el AG-Q, se aplicó una prueba de análisis discriminante multivariado. El resultado del ADM presentó D^2 de Mahalanobi de 36477, 10328 y 8212, F de Snedecor de 370, 122 y 116 y niveles de significación de 0.002, 0.008 y 0.008, para los grupos 1, 2 y 3, respectivamente. Estos resultados indican que los grupos son significativamente diferentes entre sí.

En los resultados del análisis canónico, las dos primeras funciones son significativas en la separación de los grupos y contribuyen con el 90% a la discriminación. La gráfica bidimensional de los grupos se muestra en la figura 4.8.

4.3. *Discusión.*

Los valores de ácidos grasos totales son bajos en los sedimentos superficiales del delta del Colorado. Las concentraciones de los AGT (7 a 47 $\mu\text{g/g}$ sed seco) son menores que las reportadas en otros sistemas marinos. Los aportes elevados de materia orgánica hacia los sedimentos. En ambientes caracterizados por importantes contribuciones de aportes terrígenos, como en el Golfo de St. Lawrence, Colombo *et al.* (1997) reportaron concentraciones de 59 a 247 $\mu\text{g/g}$ AGT. Cuel y Martens (1993) reportaron concentraciones de 111 a 416 $\mu\text{g/g}$ en una cuenca marina semicerrada de Carolina del Norte, las altas concentraciones de AGT en esta zona provienen principalmente de los aportes derivados de los mangles y fitoplancton marino.

Es factible considerar aportes sustantivos de material marino lábil al área de estudio. Para sedimentos superficiales del Norte del Golfo de California, que es un área clasificada como una de las zonas de alta productividad (Santamaría-del-Angel *et al.*, 1994), Chávez-Vargas (1997) reportó concentraciones de AGT entre 22 y 97 $\mu\text{g/g}$. Dentro de este área, en sedimentos de un núcleo de la Cuenca Delfín Aveytua-Alcázar (1998) encontró, concentraciones de AGT de 28 a 67 $\mu\text{g/g}$.

Aunque la zona del delta se caracteriza por una alta productividad fitoplanctónica (De la Peña-Nettel, 1991; Santamaría-del-Angel *et al.*, 1994) ésta no se refleja proporcionalmente en los sedimentos superficiales. Los altos porcentajes de AG que indican la presencia de organismos heterótrofos, especialmente en la costa oeste, sugieren que los procesos de reciclamiento de materia orgánica pueden ser muy activos en sedimentos que se resuspenden y sedimentan hasta cuatro veces en un ciclo de marea (Álvarez-Sánchez, com. pers.). Asimismo, los aportes de material alóctono lábil están

limitados por los nulos aportes fluviales del río Colorado, esto pudiera contribuir a la baja concentración de ácidos grasos totales. Otros factores pueden influir en la concentración de los AGT, como son: producción bentónica, bioturbación, reciclamiento e influencia de parámetros físicos (Colombo *et al.*, 1996; Wakeham *et al.*, 1997). Colombo *et al.* (1998), en estudios de aminoácidos en el Canal de St. Lawrence, Canadá, encontró evidencias que sugieren que la macrofauna es un sumidero selectivo del material orgánico sedimentario.

La distribución espacial de las concentraciones de AGT, normalizados con respecto al COT, muestra mayores concentraciones para la costa de Baja California y menores para la costa sonorensis. Thompson (1968) reportó, para sedimentos de la costa noroeste del Alto Golfo de California, valores de COT que variaban entre 0.27 y 0.35%. Sánchez-González (1997) encontró que los sedimentos de la margen oeste del Norte del golfo de California presentan mayor contenido de COT total con respecto a la margen este.

La determinación de grupos de estaciones significativamente diferentes, como resultado del análisis de grupos y análisis discriminante, sugieren que la distribución espacial del material orgánico está influenciada por el patrón de distribución de las corrientes de marea, que describen un giro en sentido contrario a las manecillas del reloj (Álvarez-Borrego y Galindo-Bect, 1974; Álvarez-Sánchez, com. pers.). Sin embargo, las mayores concentraciones de ácidos grasos no se encuentran en la costa de Sonora, que recibe directamente la entrada de los aportes orgánicos marinos. La costa oeste, que recibe la influencia de la descarga de la cuenca estuarina, presenta las mayores concentraciones de AGT. Esto sugiere que en la costa oeste del delta las condiciones ambientales permiten la existencia de intensos procesos diagenéticos que generan mayores cantidades de ácidos grasos por unidad de carbono según se registra en el sedimento superficial.

4.3.a. Fuentes de ácidos grasos en el delta del río Colorado.

Los resultados del AG-R muestran que las fuentes orgánicas Fitopláncton A, Fitopláncton B, Terrígena y Bacteriana son predominantes en los sedimentos superficiales del delta. Considerando las diferencias de composición entre las estaciones del área de estudio, se pudieron definir zonas biogeoquímicas como resultado del análisis de grupos en modo Q. Estas zonas fueron estadísticamente diferentes, lo que indica la existencia de condiciones ambientales que definen procesos y flujos orgánicos disímiles espacialmente.

Las contribuciones porcentuales promedio de las fuentes orgánicas a los grupos de estaciones del área de estudio se obtuvieron sumando los AG que fueron utilizados como biomarcadores específicos. Los porcentajes calculados pueden estar subestimados ya que no se incluyeron AG de baja especificidad (C14, C15 y C16). El grupo 1 (suroeste del área de estudio) presenta altos porcentajes de las fuentes zooplanctónica (34%) y terrígena (21%), el grupo 2 (costa de Sonora) es dominado por las fuentes fitoplanctónicas A y B (45%) y bacteriana (25%) y en el grupo 3 (costa de Baja California) las fuentes orgánicas bacteriana (40%) y fitoplanctónicas A y B (37%) definieron los mayores aportes porcentuales. La gran diversidad de ácidos grasos de origen marino y bacterianos indica la importancia de los aportes oceánicos y los procesos diagenéticos en el área de estudio.

El perfil de los AG del grupo 1 (G1) difiere de los otros grupos por las altas concentraciones de AG terrígenos y del zooplancton. Las altas concentraciones de biomarcadores terrígenos y C18:1w9 (zooplancton) sugieren que en esta zona de baja energía puede ser posible la mezcla de partículas orgánicas (v.g. fito y zooplancton) e inorgánicas del tamaño de limos y arcillas que contengan material terrígeno. Se han encontrado mezclas de materiales terrígenos y zooplanctónicos, con contribuciones

menores de material fitoplanctónico, en zonas con alta resuspensión de sedimentos (Colombo *et al.*, 1996). Esto sugiere que los organismos zooplanctónicos omnívoros pudieran estar ingiriendo partículas de valor alimenticio de origen diferente al fitoplanctónico.

Las bajas concentraciones ($< 500 \mu\text{g/g}$) de los AG del grupo 1 sugieren que en esta zona, que presenta influencia terrígena, las bajas velocidades de corriente residual limitan los aportes oceánicos y los procesos asociados de degradación microbiana. Esto implicaría que las altas concentraciones de AG bacterianos estarían principalmente ligadas a substratos lábiles de origen marino, vinculados a velocidades de corriente suficientemente fuertes para generar turbulencia en zonas con tamaño de grano fino.

La mayor abundancia de materia orgánica terrígena se presenta en el área de estaciones del grupo 1, cuya cobertura espacial es muy pequeña. Se ha reportado que la matriz sedimentaria puede proteger de los procesos diagenéticos los componentes orgánicos alóctonos, provocando gran estabilidad de los componentes lipídicos de origen terrígeno (Sun *et al.*, 1997). Los porcentajes de AG terrígenos (9 y 21%) localizados en la margen costera de Baja California pueden ser relacionados con el proceso de erosión/resuspensión del material de la estructura deltáica y la turbidez máxima en la zona (Carriquiry *et al.*, 1992), ya que el reabajamiento del material terrígeno durante el transporte hacia los sedimentos marinos, ocasiona que sólo los componentes más refractarios alcancen a depositarse en los sedimentos. Aunque esta descarga de la cuenca estuarina debe aportar material terrígeno al ecosistema deltáico, las clases de biomarcadores que se evaluaron en este estudio pudieran no detectar los aportes de material orgánico refractario.

La distribución espacial de las estaciones 16, 17 y 25 que forman el grupo 1 coincide con la zona del “depocentro” propuesta por Carriquiry y Sánchez (1999). En estas estaciones se encontraron valores $\delta^{15}\text{N}$ muy semejantes al del suelo agrícola del valle de Mexicali (~5‰), lo que sugiere contribuciones terrígenas importantes a la matriz orgánica sedimentaria. El valor isotópico de la estación 25 (en esta misma zona), en la cual no se evaluaron los biomarcadores lipídicos, presentó un $\delta^{13}\text{C}$ de -21.8‰ y $\delta^{15}\text{N}$ de 9‰, sugiriendo una mezcla orgánica con influencia terrígena. Ostrom *et al.* (1997) han reportado valores relativamente bajos de $\delta^{15}\text{N}$ asociados a lípidos sustantivos de células fitoplanctónicas grandes que pueden sedimentarse en condiciones de baja energía ó al efecto de fraccionamiento isotópico por la degradación microbiana. Los valores de los trazadores moleculares y ácidos grasos permiten indicar que la mezcla orgánica resultante en estas estaciones tiene una influencia terrígena que es posible separar confirmando la presencia de ácidos grasos fito y zooplanctónicos.

En la costa de Sonora (grupo 2) las concentraciones de los AG fitoplanctónicos (20 a 39%) fueron mayores, por un factor de 2, con respecto a los otros grupos. La abundancia de los ácidos C16:1w7, C18:2, C20:4 y C20:5 y el incremento de los ácidos poli-insaturados de 22 carbonos confirman que la costa sonorenses es abastecida principalmente por materiales fitoplanctónicos. Asimismo, la abundancia de los ácidos 10Me16:0, a15, i15 e i16, atribuidos a bacterias (Wakeham y Beier, 1991), es importante en el grupo 2, lo que sugiere la influencia de la degradación bacteriana sobre material fitoplanctónico que entra por la costa de Sonora. El material orgánico marino, que incluye trazadores indicativos de diatomeas, debe ser activamente diagenetizado en una zona con aportes

significativos de material orgánico lábil y altas velocidades de corriente residual (~ 5 cm/seg).

Wakeham y Beier (1991) encontraron ácidos grasos de origen bacteriano, incluyendo el 10Me16:0 (biomarcador de *Desulfobacter* sp.) en la capa oxigenada de la columna de agua en el mar Negro. Orozco-Borbón (1995) y De la Peña-Nettel (1991) reportaron para el área del golfo de Santa Clara, una productividad primaria más del doble que la bacteriana. Estudios realizados por Santamaría-del-Angel *et al.* (1994) arrojaron valores promedio de pigmentos en el intervalo de 5 a 5.3 mg/m³ para la región del Norte del golfo de California. Para la costa sonorensis, los valores promedio de pigmentos oscilaron entre 3.3 y 6 mg m⁻³ (Santamaría-del-Angel *et al.*, 1994). Asimismo, los valores de clorofila "a" variaron de entre 3.5 y 30 mg/m³, y la productividad primaria integrada fue de 78.7 mgC/m² (Valdéz-Holguín *et al.*, 1995). La alta productividad en la zona, y los procesos diagenéticos asociados, determinan la composición de origen marino de la materia orgánica sedimentaria en la costa de Sonora.

La concentración de los ácidos de origen bacteriano resultó ser más abundante en el grupo 3 que en los grupos 1 y 2 (19 y 25%, respectivamente), mientras que la concentración de los AG fitoplanctónicos disminuyó un 10% con respecto al grupo 2. Estos resultados indican que, en el área directamente influenciada por el drenaje de la cuenca estuarina, el reservorio dominante de carbono orgánico está constituido por ácidos grasos de heterótrofos microbianos. La presencia de altos porcentajes de estos AG sugieren predominio de procesos diagenéticos, pero también puede ser un efecto debido a la menor reactividad de los AG ramificados *versus* poli-insaturados y a que los mismos procesos diagenéticos transforman la molécula orgánica cambiando su bioespecificidad (Canuel y Martens, 1993; 1996). Cabe hacer notar que el ácido graso C18:1w9

(zooplancton) presentó altos valores en todos los grupos, variando entre 14 y 34%, lo que sugiere que el flujo de carbono a través de heterótrofos zooplanctónicos puede ser importante en el área de estudio.

Se ha reportado que la biomasa zooplanctónica en el Norte del Golfo de California presenta valores de hasta 150 mg/m^3 (García y Álvarez-Borrego, 1992). Este valor de biomasa es indicativo de su abundancia general, sin embargo en los sedimentos superficiales del delta del río Colorado se encontraron valores superiores a 30%. Chávez-Vargas (1997) encontró que la señal zooplanctónica fue disminuida en la región del Norte del golfo de California debido a la elevada abundancia relativa de la fuente fitoplanctónica.

La distribución espacial de los grupos de estaciones sugiere la influencia del patrón hidrodinámico de la región. Aguas de tipo oceánico con material orgánico marino son desplazadas hacia el norte, principalmente a lo largo de la costa sonorense, y hacia el interior de la cuenca estuarina durante el flujo de la marea, y aguas más turbias y salinas salen del estuario a lo largo de la costa baja californiana. La distribución de la composición de la materia orgánica en el delta del Colorado refleja tanto los aportes de material marino como los procesos diagenéticos en dicho material y del material terrígeno proveniente del depósito deltáico.

4.4. Conclusiones.

Se determinaron los ácidos grasos de la matriz orgánica superficial en el delta del río Colorado, para evaluar la variación espacial de las fuentes de materia orgánica. Las concentraciones de ácidos grasos totales encontradas en estos sedimentos fueron casi un orden de magnitud menores que las reportadas para otros sistemas con alta productividad.

Los resultados de ácidos grasos totales en el Alto Golfo de California (Chávez, 1997) coinciden con los bajos valores encontrados en este estudio, sugiriendo que la ausencia del aporte del río Colorado y los procesos diagenéticos pueden disminuir la concentración de los AGT.

Los aportes autóctonos de ácidos grasos provenientes del fitoplancton, zooplancton y bacterias hacia los sedimentos superficiales del delta del río Colorado fueron mayores que los aportes alóctonos de ácidos grasos terrígenos. La distribución espacial de los grupos de estaciones, determinados por los diferentes aportes de ácidos grasos, definió áreas biogeoquímicas donde ocurren ácidos grasos procedentes de diferentes procesos y fuentes orgánicas.

La matriz sedimentaria de la costa sonorenses está influenciada por aportes importantes de materia orgánica de origen fitoplanctónico, aunque también se detectan aportes de fuentes orgánicas bacterianas. En contraste, en la costa de Baja California el reservorio de la materia orgánica sedimentaria es dominado por aportes de organismos heterótrofos, con algunos puntos aislados de materiales zooplanctónicos y terrígenos importantes.

Los resultados muestran una diferencia espacial en la composición de la materia orgánica entre ambas costas; la principal diferencia entre estas zonas es la aportada por los AG de heterótrofos. Esto sugiere que los procesos diagenéticos son un factor importante en la variación de la composición orgánica sedimentaria y que una parte importante del reservorio de carbono que entra al sistema, pudiera pasar a otros niveles tróficos a través de la biomasa bacteriana asociada al material orgánico que sirve de sustrato.

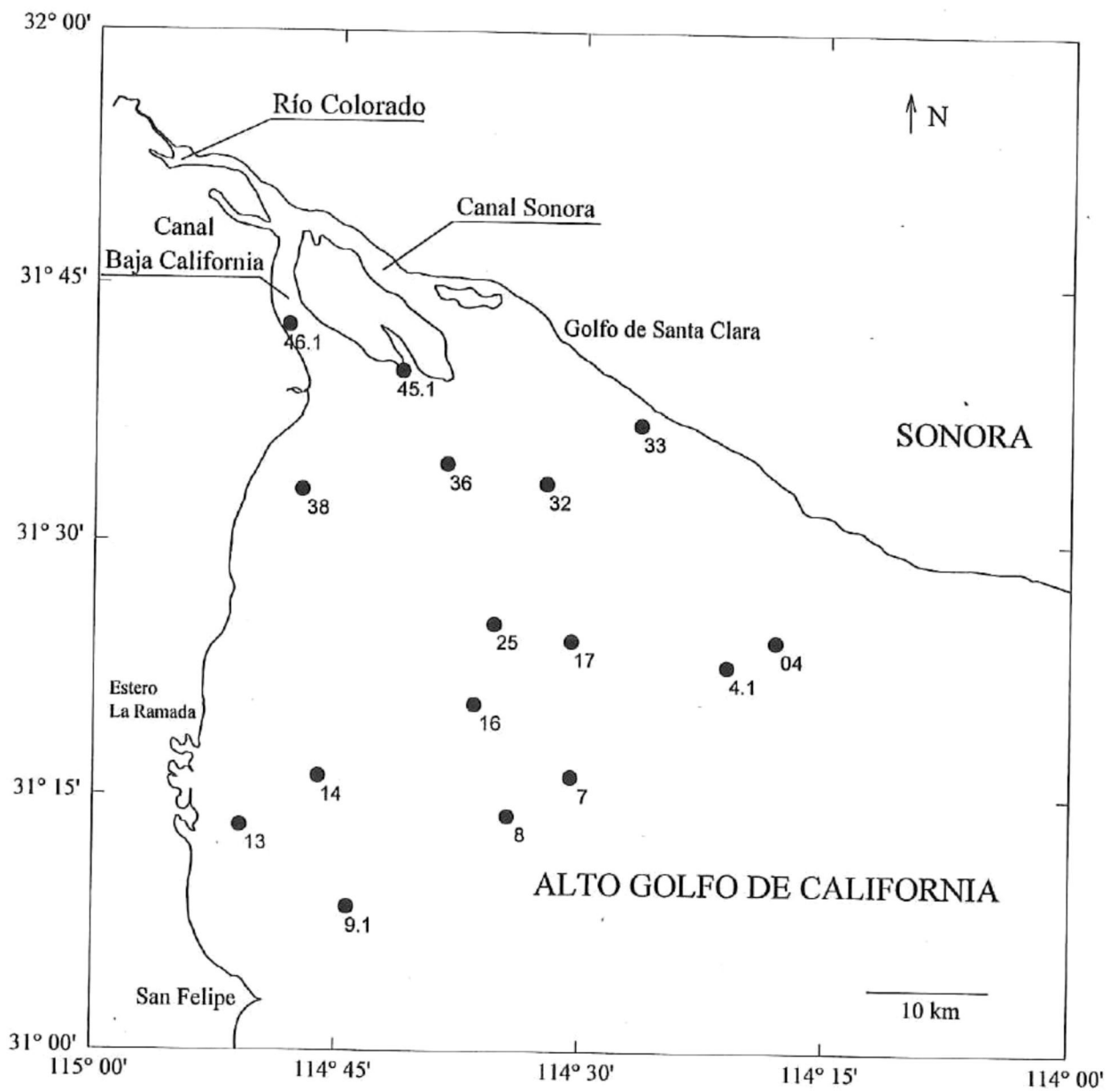


Figura 4.1. Estaciones muestreadas para determinar ácidos grasos en sedimentos superficiales del delta del río Colorado.

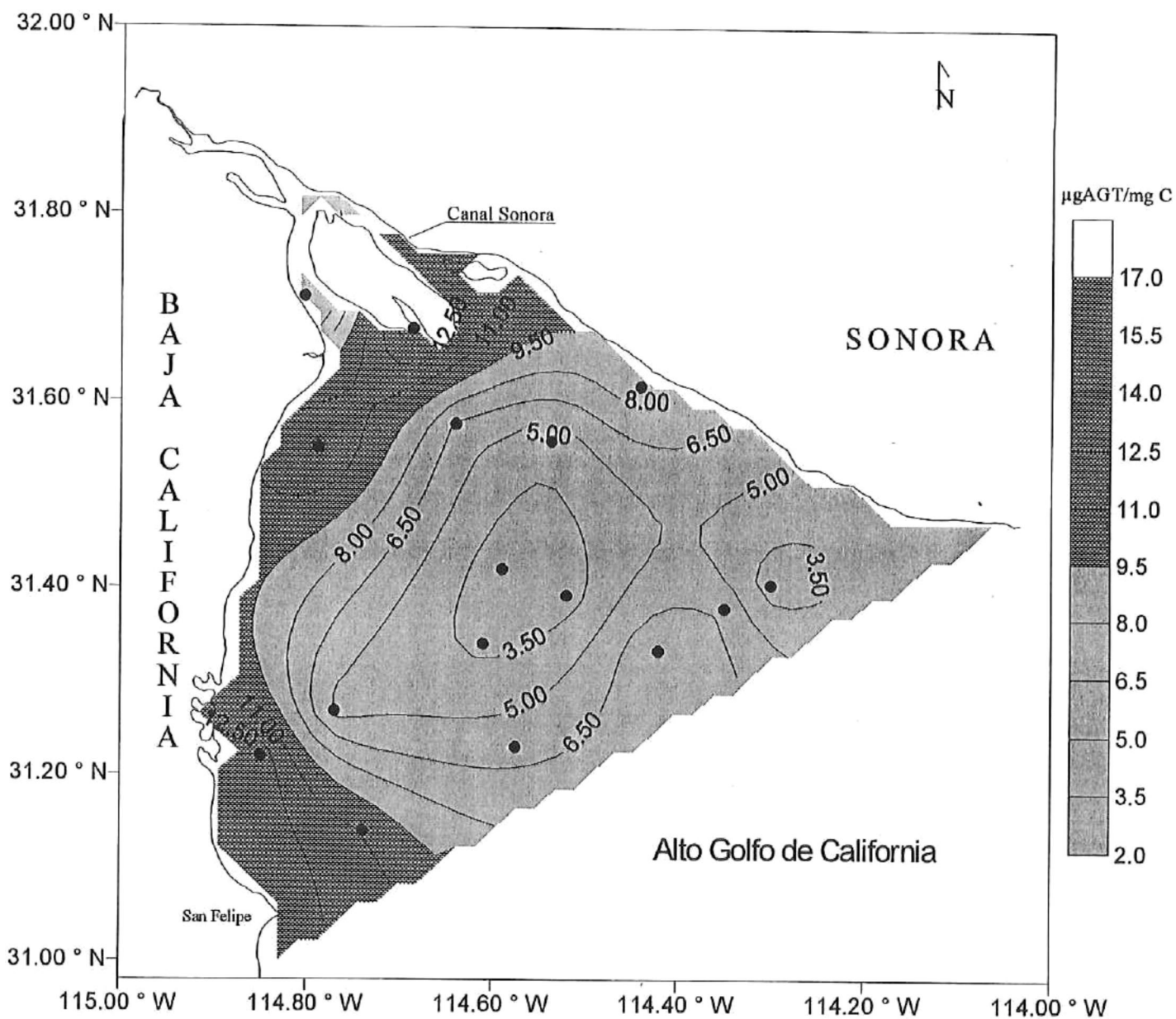


Figura 4.2. Variación de ácidos grasos totales (AGT) normalizados por unidad de carbono ($\mu\text{g AGT/mg C}$) en sedimentos superficiales del delta del Río Colorado. Los puntos negros indican las estaciones muestreadas.

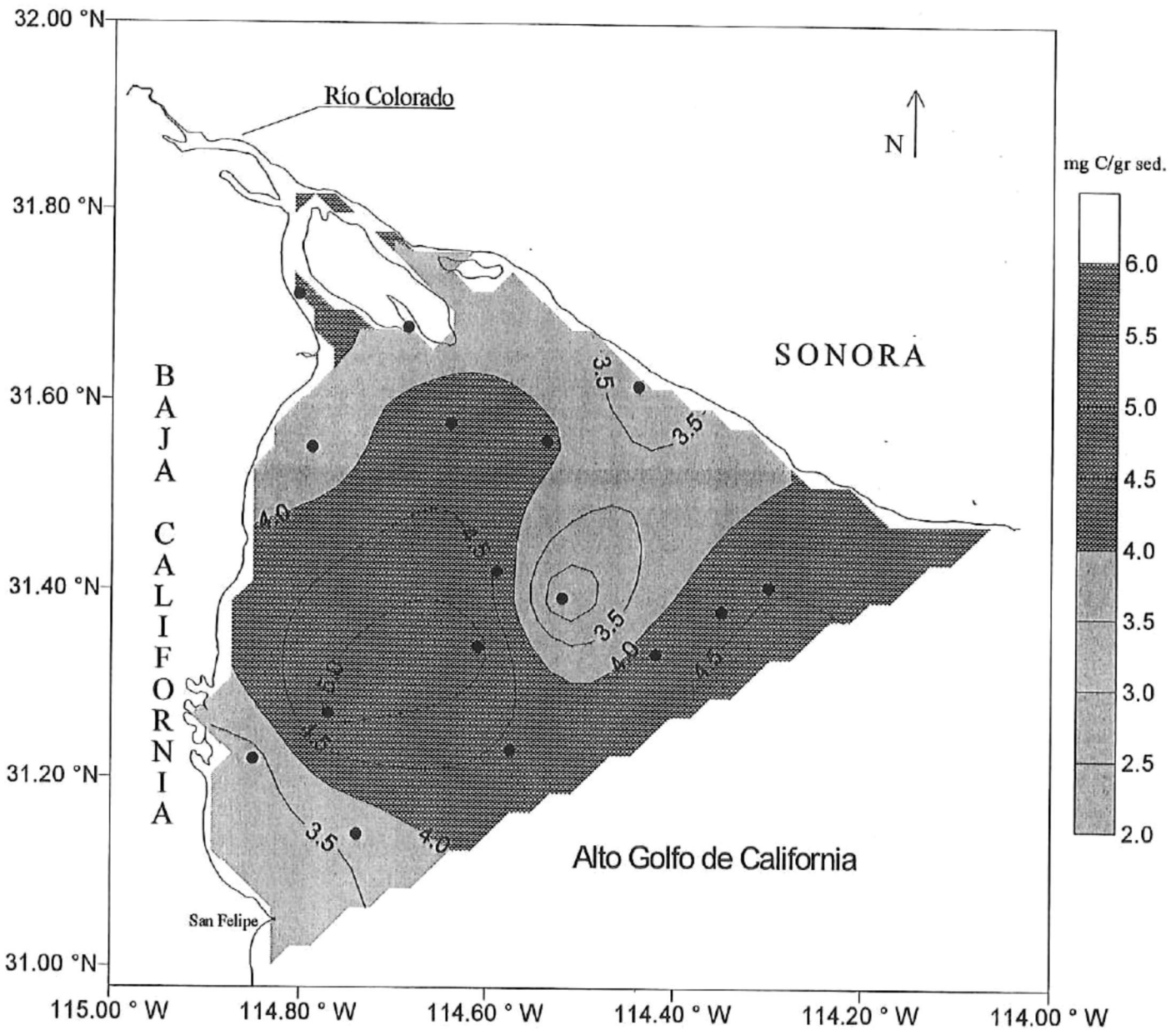


Figura 4.3. Isolneas de carbono orgánico total (mg C/gr sed. seco) en sedimentos superficiales del delta del Río Colorado. Los puntos negros indican las estaciones muestreadas.

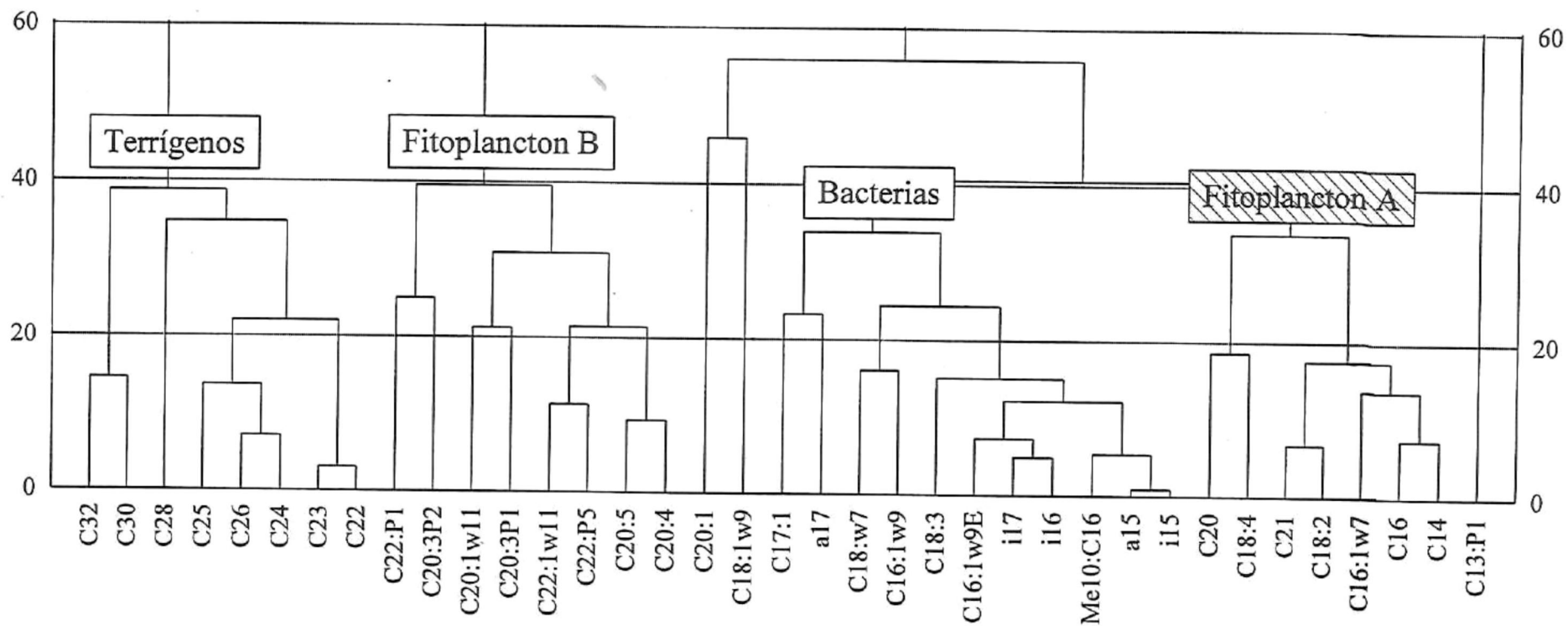


Figura 4.4. Fuentes orgánicas en los sedimentos del delta del río Colorado.

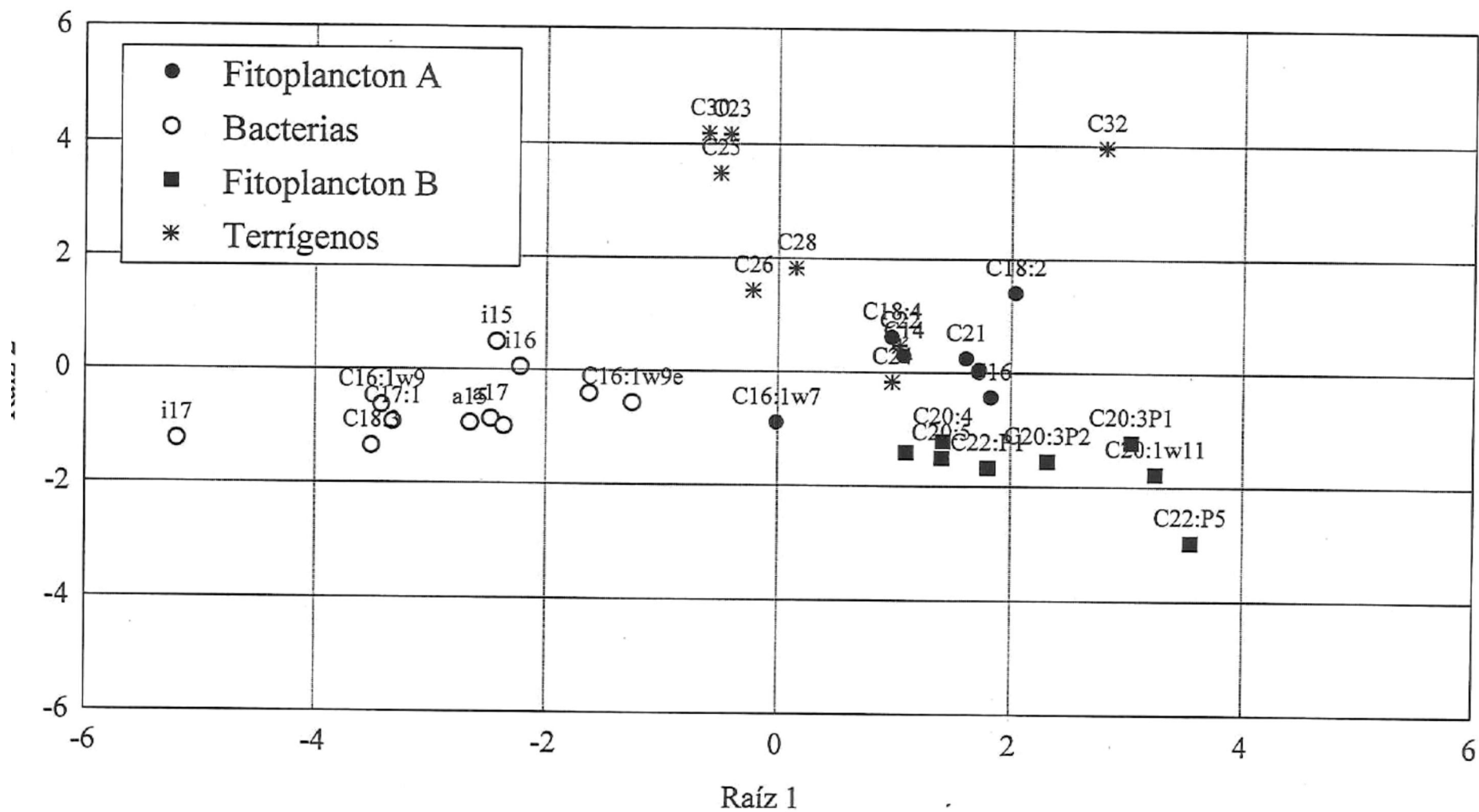


Figura 4.5. Análisis canónico de las fuentes definidas por el análisis de grupo

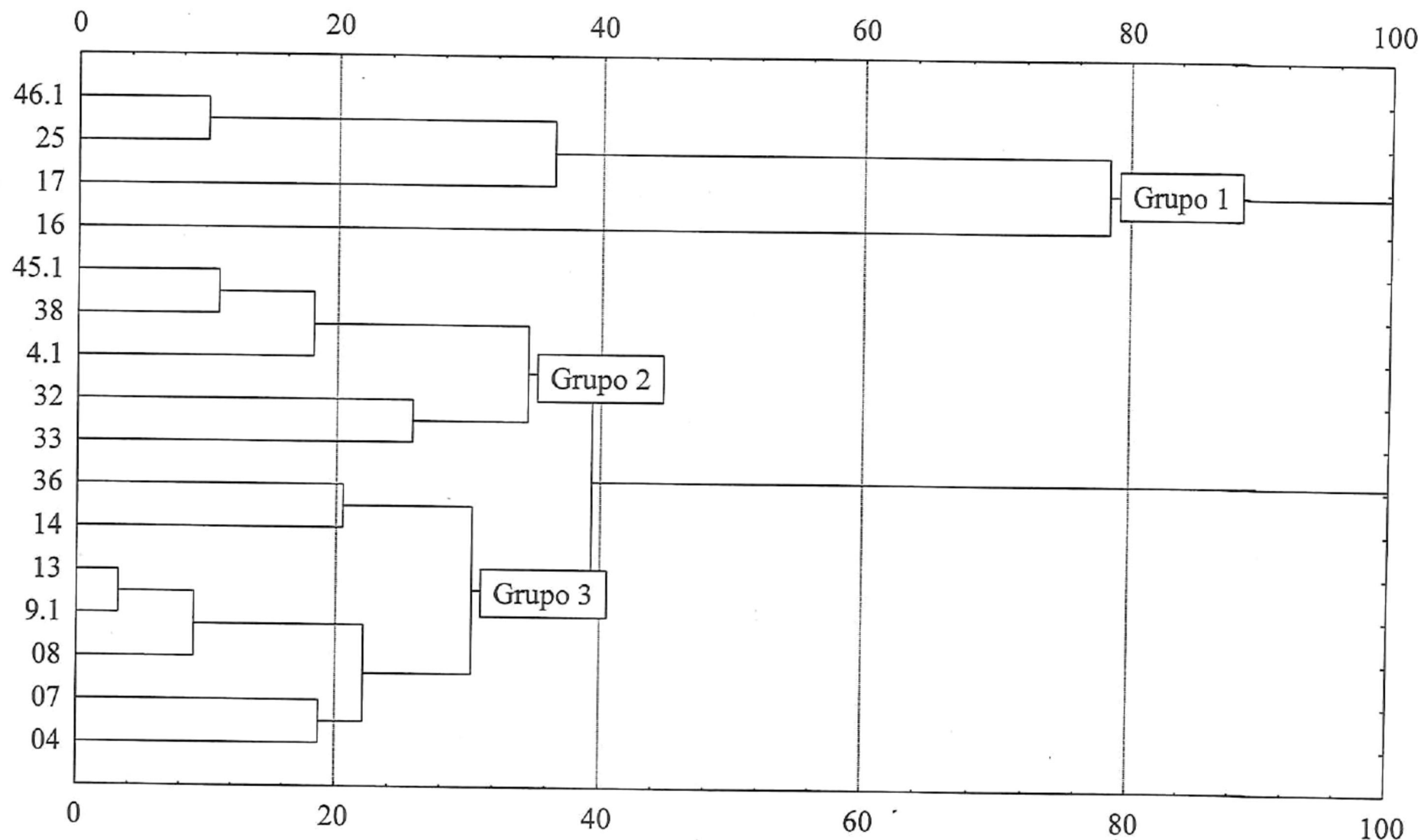


Figura 4.6. Grupos biogeoquímicos (modo-Q) en el delta del río Colorado.

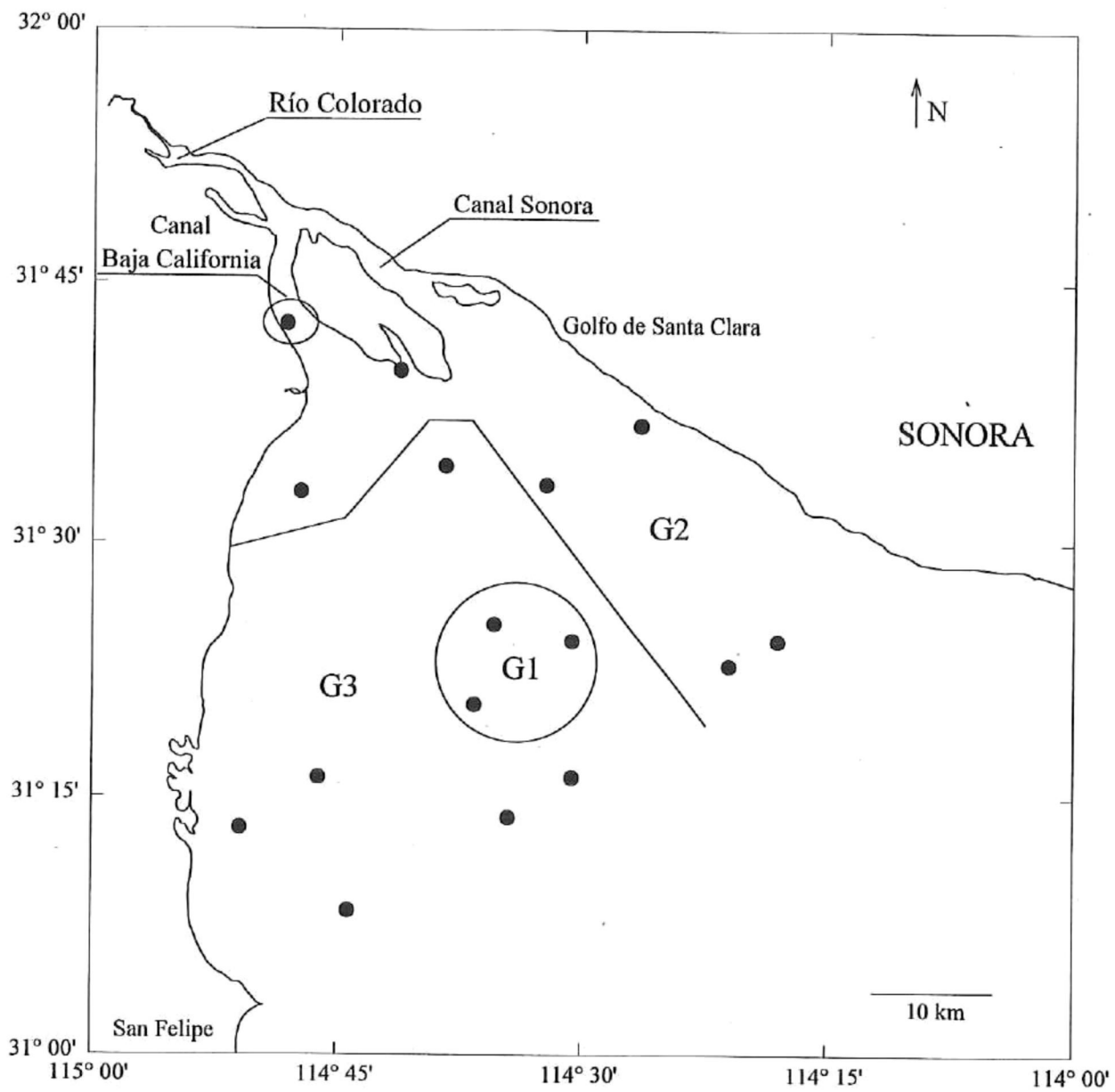


Figura 4.7. Zonas biogeoquímicas, definidas por el análisis de grupos en modo Q, en los sedimentos del delta del río Colorado.

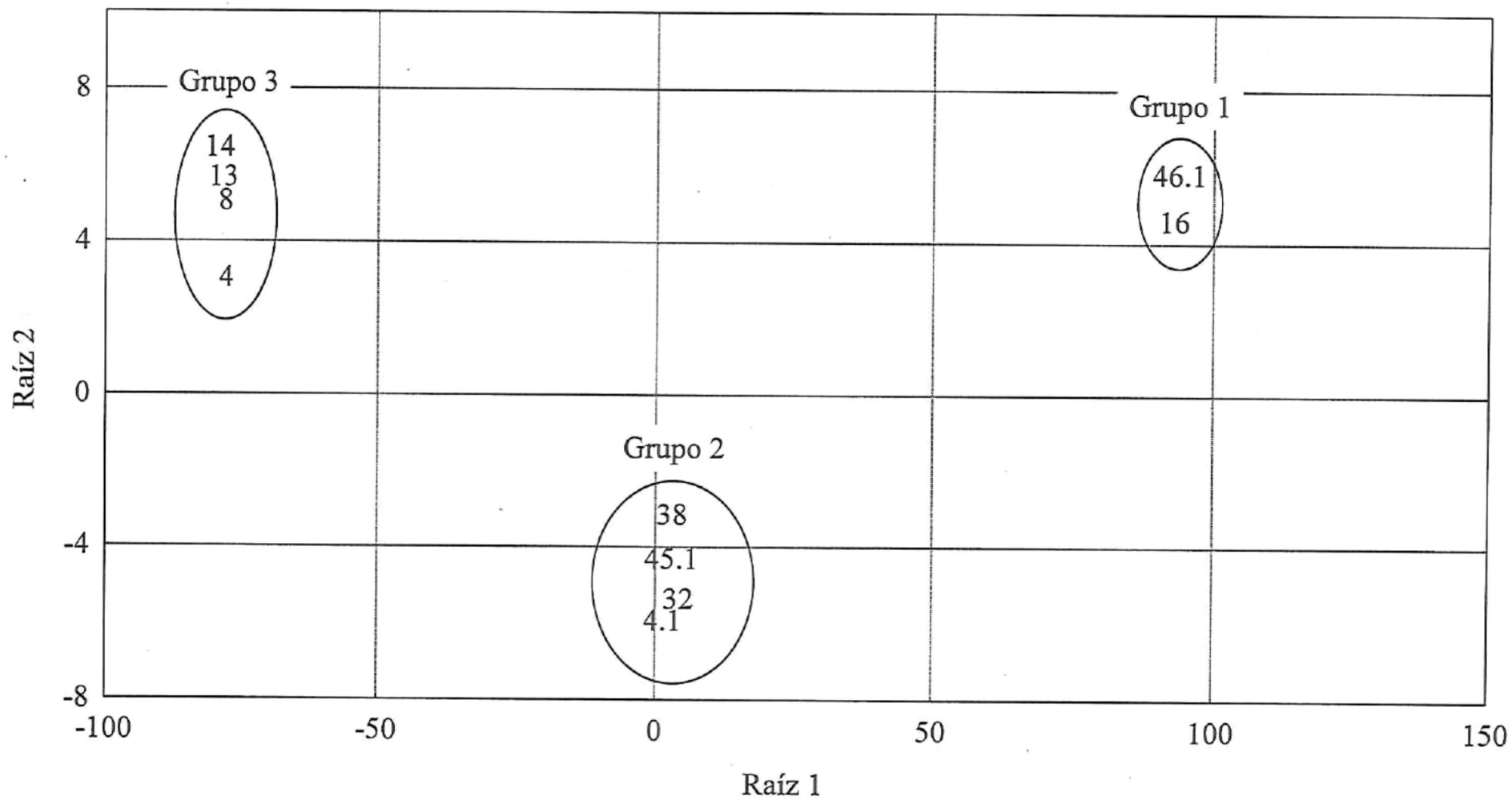


Figura 4.8. Análisis canónico de los grupos biogeoquímicos (modo-Q)

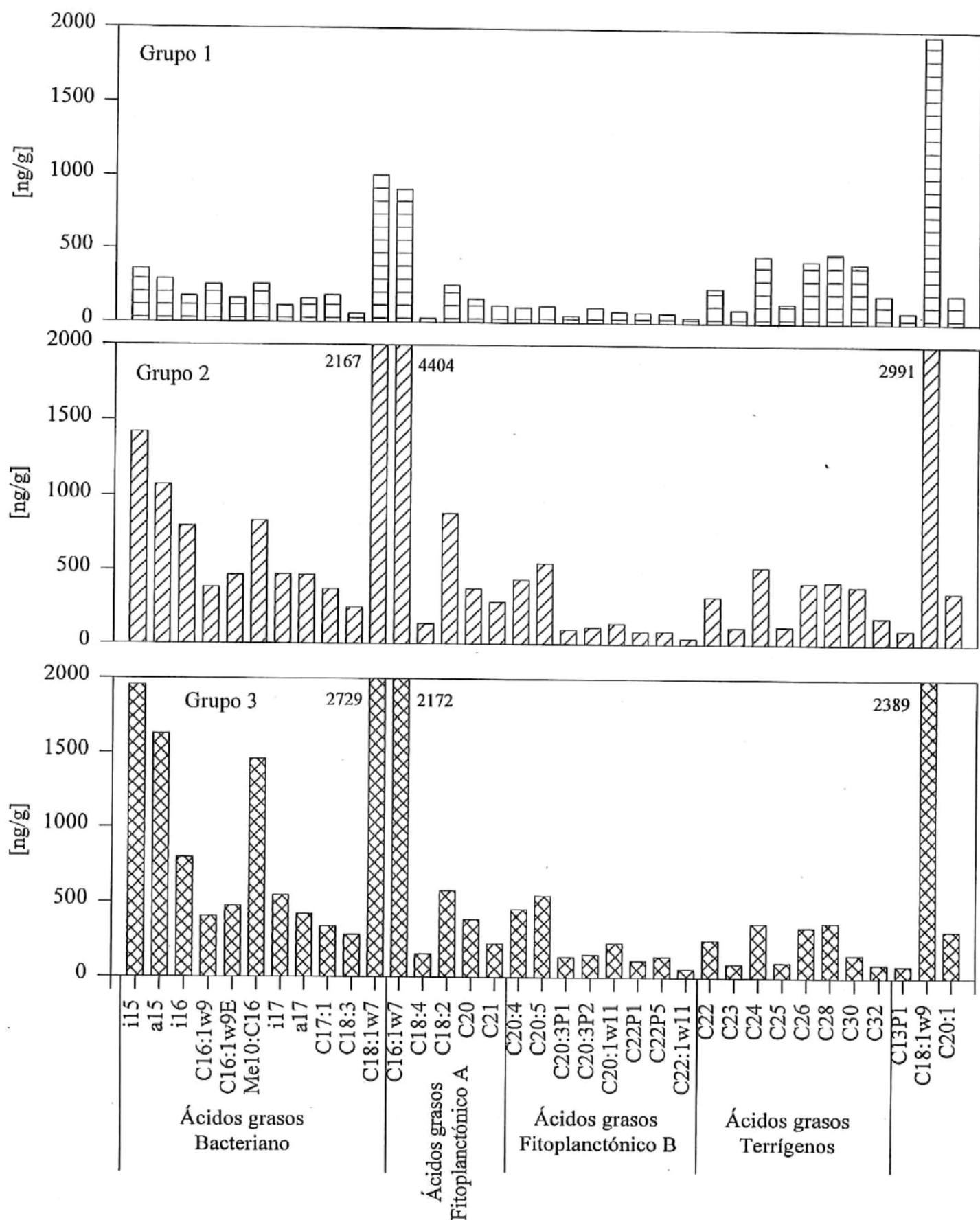


Figura 4.9. Distribución de los ácidos grasos en los sedimentos superficiales en el delta del río Colorado.

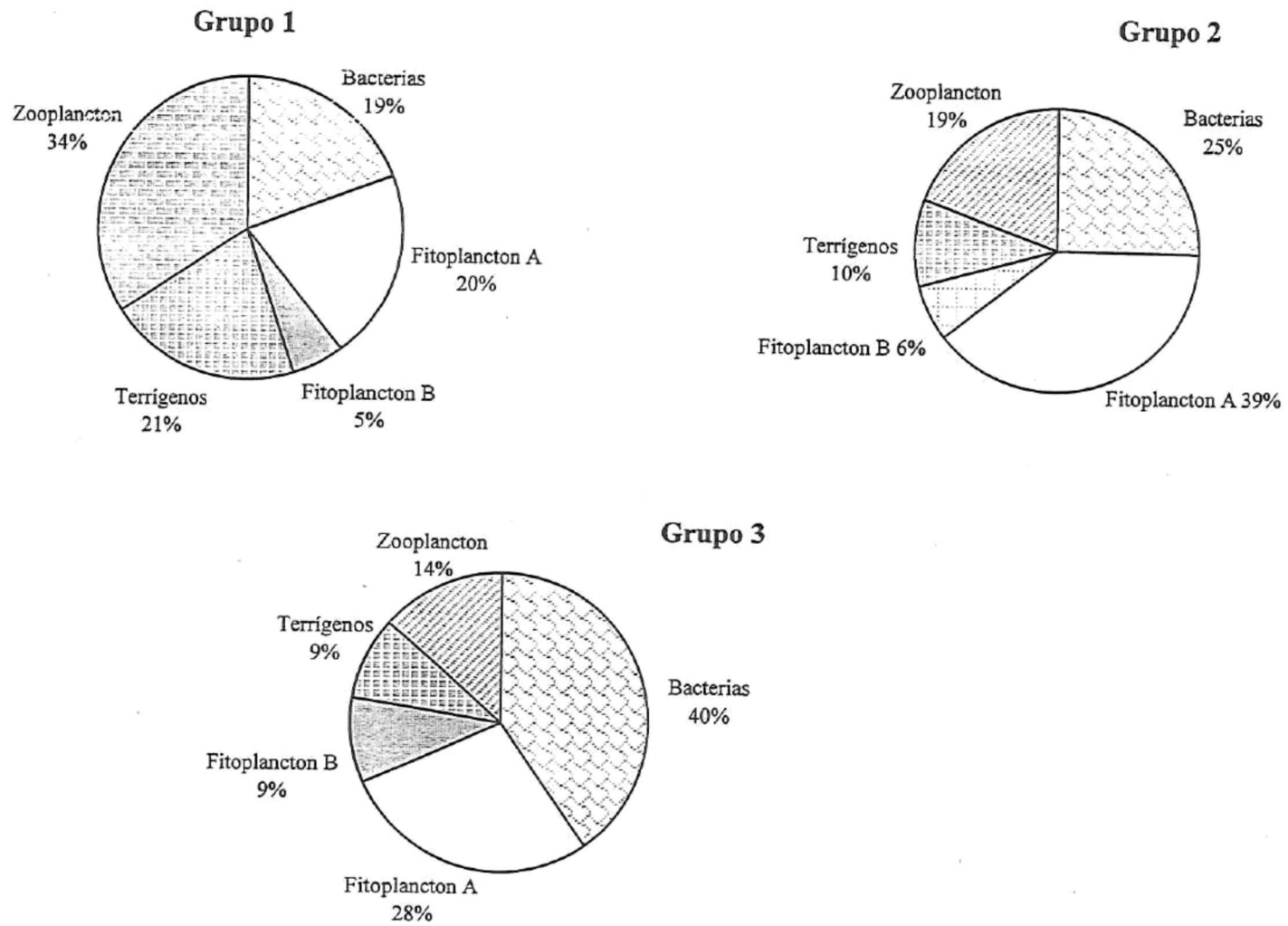


Figura 4.10. Contribución porcentual de las fuentes orgánicas en los sedimentos superficiales del delta del río Colorado.

Tabla 4.1. Ácidos grasos y carbono orgánico total en los sedimentos superficiales del delta del río Colorado.

| Estaciones | Acidos grasos totales ($\mu\text{g/g}$ sed. seco) | COT (mg) |
|------------|---|-------------|
| 46.1 | 13 | 0.47 |
| 38 | 47 | 0.36 |
| 36 | 27 | 0.44 |
| 32 | 16 | 0.41 |
| 33 | 30 | 0.32 |
| 25 | 12 | 0.45 |
| 17 | 7 | 0.24 |
| 16 | 17 | 0.53 |
| 14 | 23 | 0.52 |
| 13 | 44 | 0.33 |
| 9.1 | 39 | 0.36 |
| 8 | 26 | 0.44 |
| 7 | 35 | 0.44 |
| 4 | 12 | 0.45 |
| 4.1 | 28 | 0.44 |

Tabla 4.2. Porcentajes de ácidos grasos en el delta del río Colorado.

| | 46.1 | 45.1 | 38 | 36 | 32 | 33 | 25 | 17 | 16 | 14 | 13 | 9.1 | 8 | 7 | 4 | 4.1 |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| C13:P1 | 1.0 | 0.2 | 0.3 | 0.2 | 0.2 | 0.6 | 0.6 | 1.0 | 0.3 | 0.2 | 0.3 | 0.3 | 0.5 | 0.1 | 0.1 | 0.2 |
| C14 | 3.4 | 8.4 | 7.2 | 6.2 | 5.8 | 11.7 | 3.1 | 2.3 | 6.1 | 6.0 | 5.3 | 6.0 | 6.9 | 4.7 | 5.4 | 8.1 |
| i15 | 2.6 | 4.7 | 5.1 | 4.4 | 4.1 | 1.1 | 3.1 | 0.6 | 4.1 | 6.1 | 7.9 | 7.0 | 10.0 | 4.3 | 5.6 | 3.9 |
| a15 | 1.8 | 3.2 | 4.1 | 3.5 | 3.0 | 0.8 | 2.5 | 0.6 | 3.7 | 4.9 | 6.8 | 5.8 | 8.2 | 3.4 | 5.5 | 3.4 |
| i16 | 1.5 | 2.0 | 2.5 | 2.6 | 1.8 | 2.4 | 1.7 | 0.6 | 1.6 | 2.2 | 3.2 | 2.6 | 3.2 | 2.2 | 2.4 | 2.3 |
| C16:1ω9 | 0.9 | 0.8 | 1.2 | 1.4 | 1.1 | 1.2 | 1.7 | 4.5 | 2.4 | 1.4 | 1.3 | 1.6 | 1.4 | 1.2 | 1.1 | 1.2 |
| C16:1ω7 | 5.9 | 13.9 | 12.3 | 0.8 | 7.8 | 8.8 | 4.5 | 4.2 | 12.5 | 6.6 | 9.1 | 9.8 | 7.3 | 8.6 | 5.2 | 16.7 |
| C16:1ω9E | 1.0 | 1.1 | 1.4 | 1.4 | 1.9 | 1.2 | 1.1 | 1.1 | 1.9 | 1.1 | 1.7 | 1.9 | 1.8 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |
| C16 | 17.7 | 31.6 | 27.9 | 27.7 | 28.5 | 27.5 | 15.2 | 15.5 | 10.9 | 21.5 | 22.7 | 21.1 | 22.0 | 23.8 | 30.3 | 22.9 |
| Me10:C16 | 2.3 | 2.1 | 3.0 | 2.7 | 2.4 | 1.8 | 3.2 | 0.3 | 2.0 | 4.7 | 5.4 | 5.3 | 6.8 | 4.1 | 5.9 | 2.4 |
| i17 | 1.0 | 1.3 | 1.4 | 1.4 | 1.7 | 1.4 | 1.3 | 0.6 | 0.7 | 1.6 | 2.1 | 1.7 | 2.1 | 1.9 | 2.3 | 0.9 |
| a17 | 0.9 | 1.1 | 1.6 | 1.3 | 1.4 | 1.6 | 2.4 | 1.0 | 1.0 | 1.8 | 2.2 | 1.7 | 0.1 | 0.9 | 2.0 | 1.0 |
| C17:1 | 0.7 | 1.2 | 1.0 | 1.2 | 1.0 | 0.6 | 1.7 | 3.8 | 1.2 | 0.9 | 1.7 | 1.5 | 1.2 | 0.1 | 1.3 | 1.3 |
| C18:4 | 0.2 | 0.4 | 0.3 | 0.7 | 0.8 | 0.6 | 0.4 | 0.3 | 0.2 | 0.4 | 0.5 | 0.7 | 0.3 | 0.6 | 0.2 | 0.1 |
| C18:3 | 0.3 | 0.4 | 0.7 | 0.9 | 1.1 | 0.8 | 0.5 | 0.5 | 0.7 | 0.4 | 1.2 | 1.0 | 1.6 | 0.6 | 0.8 | 1.0 |
| C18:2 | 1.4 | 3.9 | 1.4 | 1.6 | 0.6 | 2.9 | 2.7 | 0.5 | 2.9 | 2.1 | 1.7 | 2.0 | 1.7 | 2.6 | 1.9 | 2.3 |
| C18:1ω9 | 15.3 | 5.3 | 10.3 | 12.8 | 9.4 | 12.7 | 16.5 | 11.4 | 19.0 | 12.3 | 6.0 | 6.7 | 6.0 | 8.1 | 5.4 | 6.8 |
| C18:1ω7 | 8.4 | 4.8 | 7.4 | 8.8 | 1.3 | 7.1 | 7.4 | 7.1 | 9.5 | 9.0 | 8.8 | 9.2 | 7.6 | 11.5 | 9.3 | 8.5 |
| C20:4 | 0.7 | 0.7 | 1.6 | 1.9 | 0.8 | 0.8 | 0.9 | 0.8 | 1.1 | 0.7 | 1.0 | 2.2 | 0.7 | 2.5 | 0.7 | 2.6 |
| C20:5 | 0.8 | 1.0 | 1.4 | 2.9 | 0.5 | 0.7 | 0.8 | 1.1 | 1.1 | 0.8 | 1.2 | 1.7 | 0.8 | 3.9 | 0.5 | 4.5 |
| C20:3P1 | 0.3 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.9 | 0.3 | 0.5 | 0.3 | 0.5 | 0.2 | 0.6 | 1.1 | 0.4 |
| C20:3P2 | 1.4 | 0.3 | 0.4 | 0.7 | 0.2 | 0.1 | 0.5 | 1.2 | 0.5 | 0.7 | 0.4 | 0.5 | 0.2 | 0.7 | 0.4 | 0.6 |
| C20:1 | 1.0 | 0.8 | 0.9 | 2.4 | 1.8 | 1.2 | 1.5 | 3.8 | 1.4 | 1.0 | 1.0 | 0.8 | 0.9 | 0.6 | 1.0 | 1.0 |
| C20:1ω11 | 1.6 | 0.3 | 0.5 | 0.8 | 0.4 | 0.3 | 0.3 | 0.5 | 0.2 | 0.4 | 0.5 | 0.7 | 0.3 | 1.3 | 2.6 | 0.6 |
| C20 | 1.8 | 1.1 | 0.8 | 1.1 | 1.8 | 1.2 | 2.3 | 1.2 | 0.4 | 1.4 | 1.3 | 1.1 | 1.3 | 1.6 | 1.6 | 0.9 |
| C21 | 0.8 | 1.1 | 0.6 | 0.4 | 0.6 | 0.9 | 1.0 | 1.2 | 1.0 | 0.9 | 0.6 | 0.8 | 0.8 | 1.2 | 0.2 | 0.7 |
| C22:P1 | 1.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.1 | 0.2 | 0.7 | 0.4 | 0.6 | 0.1 | 0.5 | 0.2 | 0.6 | 0.2 | 0.1 |
| C22:P5 | 0.8 | 0.2 | 0.2 | 0.5 | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 1.2 | 0.3 | 0.2 | 0.3 | 0.5 | 0.3 | 0.9 | 0.2 | 0.6 |
| C22:1ω11 | 0.4 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.1 | 0.1 | 0.3 | 0.7 | 0.2 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.2 | 0.3 |
| C22 | 1.8 | 1.0 | 0.6 | 1.0 | 2.0 | 1.2 | 2.1 | 3.5 | 1.5 | 1.1 | 0.7 | 0.6 | 0.8 | 1.1 | 1.0 | 0.5 |
| C23 | 0.8 | 0.4 | 0.2 | 0.4 | 0.7 | 0.5 | 0.8 | 1.3 | 0.5 | 0.4 | 0.2 | 0.3 | 0.3 | 0.4 | 0.4 | 0.1 |
| C24 | 3.7 | 1.6 | 0.9 | 1.5 | 3.3 | 2.2 | 4.3 | 5.8 | 2.9 | 2.4 | 1.1 | 0.6 | 1.3 | 1.2 | 1.0 | 0.4 |
| C25 | 1.2 | 0.4 | 0.2 | 0.6 | 0.9 | 0.5 | 1.3 | 1.6 | 0.7 | 0.6 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.1 |
| C26 | 3.5 | 1.2 | 0.7 | 1.7 | 3.2 | 1.7 | 4.0 | 5.0 | 2.7 | 2.5 | 1.3 | 0.4 | 1.0 | 0.8 | 0.7 | 0.2 |
| C28 | 5.1 | 1.3 | 0.6 | 1.7 | 3.7 | 1.3 | 4.0 | 5.5 | 2.5 | 2.2 | 0.7 | 1.8 | 0.9 | 0.8 | 0.7 | 0.4 |
| C30 | 4.6 | 1.1 | 0.4 | 1.2 | 3.5 | 1.1 | 3.7 | 5.8 | 1.3 | 0.2 | 0.5 | 0.2 | 0.5 | 0.5 | 0.4 | 1.1 |
| C32 | 2.4 | 0.6 | 0.2 | 0.5 | 1.6 | 0.7 | 1.8 | 2.2 | 0.6 | 0.1 | 0.3 | 0.5 | 0.3 | 0.3 | 0.2 | 0.1 |

Tabla 4.3. Análisis discriminante para las fuentes descritas del análisis de grupo modo -R.

| Fuentes | Fitoplancton A | Bacterias | Fitoplancton B |
|----------------|---|--|---|
| Bacterias | D ² :25.47, F: 5.04 p < 0.001 | | |
| Fitoplancton B | D ² :16.75, F: 2.86 p < 0.020 | D ² :30.64, F: 6.66 p < 0.0001 | |
| Terrígenos | D ² :17.38, F: 2.96 p < 0.020 | D ² :22.97, F: 4.99 p < 0.001 | D ² :22.74, F: 4.20 p < 0.002 |

D²: Distancia de Mahalanobi

F: F de Snedecor con grados de libertad 12 y 19

p: nivel de significancia, $\alpha = 0.05$

Análisis discriminante para los grupos descritos del análisis de grupo modo -R.

| Grupo | Grupo (G1) | Grupo (G2) |
|------------|--|---|
| Grupo (G2) | D ² :36477, F: 370 p < 0.002 | |
| Grupo (G3) | D ² :10328, F: 122 p < 0.008 | D ² :8212, F: 116 p < 0.008 |

D²: Distancia de Mahalanobi

F: F de Snedecor con grados de libertad 13 y 2

p: nivel de significancia, $\alpha = 0.05$

Tabla 4.4. Análisis canónico para las fuentes descritas del análisis de grupo modo -R.

| Raiz | Eigenvalores | λ de Wilks | X^2 | g.l. | p |
|------|--------------|--------------------|--------|------|-------|
| 0 | 1240809 | 0.0000 | 120.64 | 26 | 0.000 |
| 1 | 24 | 0.0406 | 22.42 | 12 | 0.033 |

p: nivel de significancia, $\alpha = 0.05$

X^2 : Chi-cuadrada

g.l.: grados de libertad

Análisis canónico para las fuentes descritas del análisis de grupo modo -Q.

| Raiz | Eigenvalores | λ de Wilks | X^2 | g.l. | p |
|------|--------------|--------------------|-------|------|-------|
| 0 | 4.59 | 0.0190 | 98.3 | 36 | 0.000 |
| 1 | 2.47 | 0.1096 | 55.26 | 22 | 0.000 |

p: nivel de significancia, $\alpha = 0.05$

X^2 : Chi-cuadrada

g.l.: grados de libertad

CAPÍTULO 5. ÁCIDOS GRASOS DE FOSFOLÍPIDOS EN LOS SEDIMENTOS SUPERFICIALES DEL DELTA DEL RÍO COLORADO.

5.1. Ácidos grasos de fosfolípidos como biomarcadores de actividad heterotrófica.

La actividad bacteriana produce gradientes fisicoquímicos complejos en los sedimentos y constituye un importante componente en los flujos de carbono y nitrógeno en sistemas oceánicos, costeros y estuarinos (Newell y Turley, 1987; Findlay *et al.*, 1990; Ducklow, 1991; Moloney y Field, 1991).

En ambientes costeros y deltáicos, donde las razones de depositación de carbono orgánico son elevadas (Hedges, 1992; Hedges y Prahl, 1993), los procesos de degradación microbiana tienen un efecto significativo en la composición de la materia orgánica de sedimentos (Canuel y Martens, 1993), que pudiera definir el destino de la materia orgánica terrígena, disuelta y particulada, en los océanos (Hedges *et al.*, 1997).

Los organismos microheterótrofos representan un importante reservorio de carbono que puede estar biodisponible para el resto de la estructura trófica a través de los organismos bacteriófagos, particularmente los microorganismos flagelados (Fenchel, 1982; Azam *et al.*, 1983; Gray *et al.*, 1984; Caron *et al.*, 1985; Turley, 1985; Newell y Turley, 1987).

Los fosfolípidos, componentes principales de la membrana bacteriana, poseen una gran diversidad estructural, asociada a una alta especificidad biológica (Parkers, 1987). Con el uso de ácidos grasos ligados a la fracción lipídica polar (AG-FOSFO) es posible estimar la biomasa y estructura de la comunidad bacteriana de sedimentos marinos (White

et al., 1979; Gillan y Hoggs, 1984; Baird y White, 1985; Findlay *et al.*, 1990; Rajendran *et al.*, 1992).

La evaluación de razones entre clases de ácidos grasos provenientes de fosfolípidos permite estimar el predominio de grupos bacterianos que pueden ser característicos de ambientes óxicos y anóxicos en sedimentos (Rajendran *et al.*, 1992). El efecto de las condiciones ambientales sobre el estado nutricional de la comunidad bacteriana puede ser evaluado por las tasas de ácidos grasos monoinsaturados *trans* frente a los *cis* (Guckert *et al.*, 1986). Las razones de las sumas de ácidos grasos específicos frente a los ácidos grasos poco específicos (v.g. i+a C15 vs C16) permiten estimar las proporciones espaciales de microorganismos eucariontes/procariontes y así poder estimar el origen de las fuentes orgánicas en la matriz sedimentaria.

En este estudio los ácidos grasos de fosfolípidos fueron utilizados como biomarcadores para estimar la distribución de los diferentes grupos de microorganismos en los sedimentos superficiales del delta del río Colorado. Se discuten los posibles mecanismos que controlan la composición microbiana sedimentaria en el área de estudio.

5.2. Resultados.

5.2.a. Variación espacial de AG-FOSFO.

Se identificaron 37 ácidos grasos de fosfolípidos (AG-FOSFO) en 10 muestras de sedimento superficial del delta del río Colorado (Figura 5.1). Las concentraciones totales de ácidos grasos variaron, de 1.5 a 1.9 $\mu\text{g/g}$ sedimento seco en la costa de Sonora, a 17.3 $\mu\text{g/g}$ sedimento seco en la costa de Baja California (Tabla 5.1). Los AG se clasificaron en seis grupos de biomarcadores: saturados mayores de 20 carbonos, saturados pares y

saturados impares menores de 20 carbonos, ramificados, monoinsaturados y poli-insaturados (Findlay *et al.*, 1990; Rajendran *et al.*, 1992; Findlay y Dobbs, 1993). Los AG-FOSFO (Figura 5.2) presentaron bajos porcentajes de ácidos grasos poli-insaturados y saturados de cadena larga (11.5% y 7.1 %, respectivamente). Los ácidos grasos ramificados y monoinsaturados presentaron porcentajes de 27.5 y 21.3 %, respectivamente, y los saturados pares sumaron porcentajes de hasta 27%, que fueron casi 5 veces mayores que los saturados impares (Figura 5.2). Los valores de las desviaciones estándar de estos porcentajes fueron altas, particularmente en el grupo de ácidos grasos poli-insaturados.

Las razones de ácidos grasos monoinsaturados frente a ramificados y las razones de AG-FOSFO *trans/cis* 16:1w9 tuvieron una distribución heterogénea con mínimos en el canal Sonora y en la estación 16 (Figura 5.3). En las estaciones 4.1, 2 y 38 se registraron los máximos valores de esta razón. Las razones de los AG-FOSFO *iso* y *anteiso* C15 vs. C16 presentaron valores más bajos en las estaciones de la costa de Sonora (Figura 5.3).

Las concentraciones de AG-FOSFO normalizadas por unidad de materia orgánica total (mg AG-FOSFO/mg C) y las biomásas bacterianas (células/gramo de sedimento seco) mostraron una distribución espacial con valores mayores en las estaciones cercanas a la costa de Baja California decreciendo hacia la costa de Sonora (Figuras 5.4 y 5.5). Las biomásas bacterianas fueron calculadas con base en los AG-FOSFO totales por gramo de sedimento seco, considerando los factores de conversión de White (1979), quien reportó que la bacteria promedio, del tamaño de *E. coli* (0.4 a 1.0 μm), contiene aproximadamente 100 μmol de AG-FOSFO por gramo de bacterias, y que 1 g de bacterias es equivalente a 5.9×10^{12} células, lo que proporciona 1.7×10^{17} moles de AG-FOSFO por célula

bacteriana (Mancuso *et al.*, 1990). Esto permitió estimar biomásas bacterianas desde 9.3×10^8 cel/g sedimento seco (estación 2) a aproximadamente 4×10^9 cel/g sedimento seco (estaciones 38 y 13).

5.2.b. Análisis factorial.

Se realizó una exploración estadística de los datos, para determinar si existe un patrón de distribución de las estaciones en el área de estudio. Los resultados se obtuvieron con el uso del análisis factorial por extracción de componentes principales (Davis, 1986). Este tratamiento estadístico, aplicado a la matriz de porcentajes de clases de AG-FOSFO, permitió considerar el mayor número de ácidos grasos y estaciones.

Los resultados, en el modo Q, muestran que los factores 1 y 2 explican el 83.8% de la variancia total del sistema, contribuyendo con 56.9% y 26.9%, respectivamente (Tabla 5.2). Las cargas de los factores 1 y 2 mayores que 0.7 agrupan las estaciones de acuerdo a sus valores positivos y negativos (Figura 5.8). El factor 1 agrupa las estaciones 37, 16, 46 con cargas positivas, y las estaciones 46.1 y 13 con cargas negativas. El factor 2 contiene las estaciones 34, 2 y 4 con cargas positivas, y la estación 38 con carga negativa (Tabla 5.2; Figura 5.9).

Las estaciones 46 y 46.1, que comprenden la zona de canales de la isla Montague, se diferenciaron por sus cargas dentro del factor 1; el resto de las estaciones de este factor están situadas frente a la costa Baja California, mientras que las cargas positivas del factor 2 representan la costa de Sonora (Figuras 5.6 y 5.7; Tabla 5.2).

5.2.c. Prueba de homogeneidad de variancia.

Para validar la separación de los factores y sus cargas, que resultaron del análisis factorial, se aplicó un análisis de variancia multivariado (ANVAMU) a los grupos generados. El propósito del análisis fue probar las diferencias significativas entre las medias de los grupos. Como requisito previo a esta exploración estadística fue necesario determinar si los datos presentan una distribución normal, además, contrastar si las variancias de los grupos definidos son iguales. Para ello se realizó una prueba de homogeneidad de variancia donde la hipótesis a demostrar fue:

Ho: la variancia de los grupos es igual

Ha: al menos uno es diferente

Los resultados obtenidos de la prueba de homogeneidad de variancia de Levene (una medida absoluta de las desviaciones de las medias) con un $\alpha = 0.01$ (Tabla 5.3) muestran que las cargas positivas y negativas de los factores 1 y 2 presentan variancias iguales, lo que permitió continuar con el análisis de variancia multivariado.

5.2.d. Análisis de varianza multivariado (ANVAMU).

La prueba ANVAMU se realizó estableciendo la hipótesis que pudiese explicar la igualdad o diferencia entre los grupos definidos por el análisis factorial.

Ho: $F1+ = F1- = F2+ = F1-$ (1)

Ha: al menos un grupo es diferente.

La prueba de ANVAMU de Wilks y Rao (una medida de la razón de la variancia dentro de los grupos frente a la variancia total de los mismos), mostró que la probabilidad obtenida ($p < 0.001$, $\alpha = 0.01$) permite rechazar la hipótesis nula (Ho) en favor de la

hipótesis alternativa (H_a), estableciéndose que entre los factores con cargas positivas y negativas al menos uno es desigual (Tabla 5.4.)

Después de obtener una λ de Wilks y R de Rao estadísticamente significativa del ANVAMU, se realizó una prueba “honestá” de Tukey (para muestras de tamaño desigual) para conocer cuál de las medias de los grupos contribuye a diferenciar significativamente, esto es, qué grupos particulares son diferentes entre sí. Los resultados obtenidos, con un $\alpha = 0.05$, para las combinaciones de cada factor se muestran en la Tabla 5.5.

Los grupos de ácidos grasos monoinsaturados y poli-insaturados fueron significativamente diferentes entre las estaciones con carga positiva del factor 2 (costa de Sonora) y el resto de las estaciones (Tabla 5.5). Los ácidos grasos ramificados, saturados impares y los saturados mayores de 20 carbonos fueron significativamente diferentes en todas las estaciones con carga positiva y negativa que agrupan los factores 1 y 2. Los ácidos grasos saturados pares fueron significativamente diferentes en todos los grupos, excepto entre las estaciones de la costa de Baja California (carga negativa del factor 1) y las estaciones con carga positiva del factor 2 (Tabla 5.5).

5.2.e. Clases de AG-FOSFO.

La figura 5.10 muestra los porcentajes de las clases de fosfolípidos clasificados por las cargas positivas y negativas de los factores 1 y 2. En las estaciones 34, 4 y 2 del factor 2, los AG-FOSFO monoinsaturados y los ramificados presentaron porcentajes de 35%, mientras que en las estaciones del factor 1 estos porcentajes fueron hasta de 60% (Figura 5.8), representando, en promedio, 11% más de ácidos grasos ramificados en la costa de Baja California que en la costa de Sonora (Tabla 5.6).

De manera inversa, los ácidos grasos poli-insaturados de las estaciones del factor 2 fueron, en promedio, 12% mayores que en las estaciones del factor 1 (Tabla 5.6). La estación 38 (carga negativa del factor 2), situada al sur de punta Sargento, presentó porcentajes muy similares a las estaciones con carga negativa del factor 1. Esta distribución espacial de AG contribuye a explicar los resultados de la prueba de Tukey, indicando la existencia de ambientes sedimentarios distribuidos espacialmente de acuerdo a la contribución relativa de las clases de ácidos grasos de fosfolípidos.

La contribución de AG-FOSFO saturados mayores de 20 carbonos en las estaciones con carga positiva del factor 1 (Tabla 5.2) fue 8% mayor que en las estaciones con carga negativa de este factor (Figura 5.8). En el factor 2, las estaciones 34, 4 y 2 aportaron 10% menos de AG mayores de 20 carbonos que la estación 38, situada más cercana a la costa de Baja California (Figuras 5.1 y 5.6).

En las estaciones con carga positiva del factor 2 los ácidos grasos saturados pares (<19 carbonos) contribuyeron con el 25%, lo que es consistente con el alto porcentaje (21%) de ácidos grasos poli-insaturados de este factor. En las estaciones del factor 1, estos ácidos pares contribuyeron con más del 25%, pero coincidieron con altos porcentajes de ramificados y monoinsaturados (Figura 5.8).

Los promedios de las razones de ácidos grasos monoinsaturados frente a ramificados y de AG *trans/cis* 16:1w9 son un 30% menor en las estaciones del factor 1 que en el factor 2. Esto contribuye a definir su variación espacial en los sedimentos (Figuras 5.3 y 5.7). En la Tabla 5.6 las razones de AG-FOSFO *iso* y *anteiso* C15 sobre C16 de los factores 1 y 2 presentaron promedios muy similares, con una diferencia de 0.1. Sin embargo, si se considera que las máximas razones se presentaron en las estaciones 37

y 13 de la costa de B.C., es posible indicar un enriquecimiento por un factor superior a 1.5 de AG de fosfolípidos de origen fitoplanctónico en las estaciones 34, 4 y 2 (estaciones con carga positiva del factor 2), que representan la costa de Sonora (Figuras 5.3 y 5.7) y que son significativamente diferentes del resto de las estaciones (Tabla 5.5).

La zona de canales de la isla Montague presentó marcadas diferencias en la composición de biomarcadores con relación a las costas. En la estación 46.1 (canal de Baja California) los ácidos grasos ramificados fueron aproximadamente 15 % mayores que los registrados para la estación 46 (canal de Sonora) (Tabla 5.6). Análogamente, la razón de ácidos grasos monoinsaturados sobre ramificados fue mayor por un factor de dos en el canal Sonora (0.8) que en el canal B.C.(0.4). Estos resultados concuerdan con los valores encontrados para la razón *trans/cis* 16:1w9 (0.5) e *iso* y *anteiso* C15 sobre C16 (0.31) de la estación 46 (Tabla 5.6).

Estos resultados indican la existencia de condiciones aeróbicas y ácidos grasos de origen microeucariontico en el canal Sonora. Las estaciones 46.1 y 37 presentaron el máximo valor (0.9) de la razón *trans/cis* 16:1w9 en el factor 1, lo que sugiere la presencia de condiciones ambientales que pudieran promover la producción de AG-FOSFO *trans*.

5.2.f. AG-FOSFO individuales.

Los resultados del análisis de los ácidos grasos individuales encontrados en los grupos de estaciones (Factores 1 y 2) se utilizaron para explicar los posibles mecanismos que controlan la estructura de la comunidad bacteriana del área de estudio. Considerando todos los ácidos grasos de fosfolípidos detectados, se realizó una prueba de correlación entre las estaciones que conforman los factores 1 y 2. Se encontró que las estaciones 46.1

(canal B.C.) y 4 (costa de Sonora) son las únicas que no presentan una correlación de significación a un $\alpha=0.05$. Cabe señalar que los ácidos grasos 10Me16:0 y C20:4 se salen de la distribución de los datos (Figura 5.9), sugiriendo que estos biomarcadores contribuyen significativamente a la diferencia entre los factores 1 y 2.

En el perfil de ácidos grasos de las estaciones del factor 1 (Figura 5.10), los ácidos grasos saturados C22 y C24 son los que caracterizan el aporte terrígeno (11% en la Figura 5.8) en las estaciones 37, 16 y 46. En contraste, en las estaciones con carga negativa del factor 1 (estaciones 13 y 46.1) estos ácidos grasos saturados de más de 20 carbonos aportaron un bajo porcentaje (3%) (Figuras 5.8 y 5.10). Cabe señalar que todos los grupos de estaciones de los factores 1 y 2 fueron significativamente diferentes entre sí para la clase de AG saturados mayores de 20 carbonos (Tabla 5.5).

En el factor 2 el porcentaje del ácido graso C20:4 de la estación 4 fue casi un orden de magnitud mayor que el encontrado en el resto de las estaciones (Figura 5.11), lo que contribuye a explicar que el porcentaje de ácidos grasos poli-insaturados sea 14% mayor que el encontrado en los grupos del factor 1 (Figuras 5.8) y que el grupo de estaciones con carga positiva del factor 2 (estaciones 2, 34, 4) sea estadísticamente diferente del resto de los grupos (Figura 5.7; Tabla 5.5). La detección del C20:4 se corroboró con CG-DSM.

El grupo de ácidos grasos ramificados fue significativamente diferente en todos los grupos de estaciones de los factores 1 y 2 (Tabla 5.5). En el factor 1 los AG-FOSFO ramificados se diferenciaron entre las estaciones con carga positiva y negativa, principalmente por la contribución del ácido 10Me16:0 (24.5%) en el canal Baja California (estación 46.1) y su ausencia en la estación 46 del canal de Sonora (Figuras 5.7

y 5.10) en el resto de las estaciones de los factores 1 y 2, el 10Me16:0 presentó porcentajes promedio de 3.8%.

En el factor 2, los ácidos grasos *iso* y *anteiso* C15 fueron 3% mayores en la estación 38, con carga negativa, que en las estaciones con carga positiva (Figura 5.11). Estas últimas definen la costa de Sonora, mientras que la estación 38 se encuentra al sur de la isla Montague (Figura 5.1).

El ácido graso C16 contribuyó de manera importante (13.4 a 23.8%) al porcentaje promedio de AG saturados pares de todas las estaciones (Figuras 5.2, 5.10 y 5.11). Se evaluó la proporción de la proveniencia auto o heterótrofa de los AG, determinando la razón del C16 con los *iso* y *anteiso* C15 (Tabla 5.6). Estas razones fueron, en promedio, 20% más bajas en las estaciones con carga positiva del factor 1 (estaciones 16, 37 y 46) que en las estaciones con carga negativa (46.1 y 13) del canal y costa de Baja California (Tabla 5.6).

En el factor 2, el grupo de estaciones que caracteriza la costa de Sonora (estaciones 4, 2 y 34) fue, en promedio, 20% menor que en el grupo de estaciones con carga negativa (46, 37 y 16) del factor 1 que caracterizan la costa de Baja California. Los resultados de la prueba de “honesta” de Tukey demuestran que no existe diferencia significativa para los ácidos grasos saturados pares entre los grupos de estaciones F2(+) y F1(-) que describen la costa de Baja California y Sonora (Tabla 5.5; Figura 5.7).

Estos resultados contribuyen a estimar el origen de los ácidos grasos saturados pares en el área de estudio. Asimismo, indican la utilidad de recurrir a razones de ácidos grasos específicos contra clases de AG de fosfolípidos para explicar posibles orígenes de la composición lipídica en estos ambientes sedimentarios.

La contribución porcentual de los AG monoinsaturados fue de 22% en ambos grupos de estaciones del factor 1 (Figura 5.8). La prueba estadística de Tukey demostró, con un $\alpha = 0.05$, que los ácidos grasos monoinsaturados de las estaciones 2, 4 y 34 (F2+) son significativamente diferentes del resto de los grupos de estaciones (Tabla 5.5). La contribución de AG *trans* fue alta en el área. Para las estaciones con carga positiva (46, 16 y 36) del factor 1, los monoinsaturados *cis* C16:1w9Z, C18:1w9Z sumaron 28.9%, mientras que los *trans* C16:1w9E y C18:1w7E sumaron 34.6% para estas mismas estaciones. En las estaciones con carga negativa del factor 1 (13 y 46.1) los AG *cis* sumaron 20.1% y los *trans* 16.8%.

Los grupos de estaciones del factor 2 presentaron porcentajes de ácidos grasos monoinsaturados que variaron entre 15% (F2+) y 24% (F2-) (Figura 5.8). Aunque específicamente la razón promedio *trans/cis* del ácido graso C16:1w9 fue alta para las estaciones 4, 2 y 38 (Tabla 5.6), se encontró que para las estaciones con carga positiva (34, 4 y 2) del factor 2, los monoinsaturados *cis* (C16:1w9Z, C18:1w9Z) sumaron 24.3%, mientras que los *trans* C16:1w9E y C18:1w7E sumaron 25.7%. En el factor 2, en la estación 38 (carga negativa) los ácidos *cis* sumaron 7.2% y los *trans* 10.4%.

El ácido graso C18:1w7E estuvo presente en todas las estaciones del factor 1 (Figura 5.10), mientras que el C18:1w9E sólo se registró en la estación 13 (estero La Ramada). En general este grupo de estaciones (13 y 46.1) fue caracterizado por la contribución de monoinsaturados *trans* C16:1w9E, C18:1w9E y el ácido graso cíclico Cy10 (Figura 5.10).

Las sumas totales de los ácidos grasos *cis* y *trans* de los grupos de estaciones con carga positiva y negativa de los factores 1 y 2 fueron sometidas a un ANOVA de dos vías.

Los resultados demostraron que no existen diferencias significativas en los factores ni entre los factores. Este hecho está sustentado por las altas contribuciones de AG-FOSFO *trans* en prácticamente todas las estaciones del área de estudio. Esto sugiere la presencia constante de algún tipo de tensión ambiental (v.g. anaerobiosis, alta movilidad del sustrato) en la comunidad bacteriana de estos sedimentos (White, 1988).

5.3. Discusión.

Se hizo la determinación de los ácidos grasos de fosfolípidos en los sedimentos superficiales buscando representar posibles zonas ambientalmente disímiles como las señaladas por Zamora-Casas (1994) y Cupúl-Magaña (1994). Los porcentajes promedio de AG-FOSFO presentaron una alta desviación estándar indicando una gran heterogeneidad espacial en la composición de la materia orgánica de los sedimentos estudiados.

La dominancia relativa de microorganismos característicos de ambientes determinados se estimó con base en las diferentes proporciones de grupos de ácidos grasos en los sedimentos superficiales del área de estudio. Para establecer la existencia de grupos de microorganismos se clasificaron los ácidos grasos de acuerdo a Gillan y Hogg (1984), Findlay *et al.* (1990) y Findlay y Dobbs (1993), quienes propusieron grupos de microorganismos con base en ácidos grasos provenientes de fosfolípidos. Los microeucariontes son representados por ácidos grasos poli-insaturados; los AG monoinsaturados representan grupos de procariontes aeróbicos; las bacterias anaerobias y gram positivas son representadas por ácidos grasos saturados y ramificados en el intervalo C14 a C16 y las bacterias sulforeductoras y otras bacterias anaerobias, por ácidos grasos saturados y ramificados en el intervalo de C16 a C19. Esta clasificación permitió

caracterizar espacialmente la distribución de grupos de organismos de ambientes óxicos y anóxicos en el delta del Colorado (Tablas 5.5 y 5.6).

De acuerdo a esta clasificación, en los sedimentos superficiales del delta se encontraron mayores contribuciones de organismos heterotróficos y una menor contribución de microeucariontes y material terrígeno. Los AG ramificados, monoinsaturados, ciclopropilos y saturados pares menores de 20 carbonos han sido atribuidos a poblaciones bacterianas en sedimentos marinos (Volkman *et al.*, 1980; Gillan y Hogg, 1984). De los 37 ácidos grasos identificados en las muestras del delta, más del 50% son de origen bacteriano. Esto indica que la materia orgánica que se deposita en los sedimentos superficiales es viable para los heterótrofos microbianos.

Se ha señalado que los ácidos grasos del C14 al C18 no son específicos ya que mantienen una amplia distribución filogenética y es poco recomendable utilizarlos como biomarcadores de bacterias (Findlay *et al.*, 1990; Findlay y Dobbs, 1993), ya que esta clase de ácidos grasos estaría efectivamente involucrando aportes de organismos autótrofos y heterótrofos, pero en proporciones desconocidas.

En este estudio, el porcentaje de lípidos saturados de menos de 20 carbonos fue importante (>30%), por lo que se consideró resolver su contribución basándose en las razones con los ácidos grasos *iso* y *anteiso* C15 sobre poli-insaturados, y de esta manera estimar una predominancia auto o heterótrofa de los AG-FOSFO (Tabla 5.6). Hedges y Prah (1993) han señalado la necesidad de identificar tratamientos analíticos, y de procesado de datos, que permitan determinar el origen orgánico, especialmente en ambientes someros donde los aportes de eucariontes pueden ser sustantivos (Findlay y Dobbs, 1993).

La determinación de los AG-FOSFO proporciona una medición cuantitativa de la biomasa heterotrófica viable (Baird *et al.*, 1985; White, 1993). La distribución de la biomasa en la zona de estudio está basada en las concentraciones totales de AG (White, 1979). Este método supone que todos los ácidos grasos detectados provendrían de microheterótrofos, por lo que pudiera sobrestimar estos valores de biomasa bacteriana. Por otro lado, Baird y White (1985) señalan que las estimaciones de biomasa calculadas por este método pueden ser subestimadas, bajo la suposición de que el tamaño de las células bacterianas es similar al de *E. coli*.

Las biomasa bacterianas estimadas por ácidos grasos de fosfolípidos fueron un orden de magnitud mayores a las reportadas por Rajendran *et al.* (1992), quien reportó biomasa máximas de 1.7×10^8 cel/g sedimento seco, en sedimentos costeros contaminados de la bahía de Hiroshima. Los valores de biomasa en este estudio fueron menores a los reportados por Gillan y Hogg (1984), quienes encontraron biomasa dos órdenes de magnitud mayores (1.3×10^{11} cel/g de sedimento seco) en sedimentos de manglares. Por otro lado, Smith (1986) en sedimentos de la Antártida, y White (1993) en sedimentos de estuarios tropicales, han encontrado que la biomasa bacteriana se encuentra consistentemente alrededor de 1×10^9 cel/g sedimento seco.

En el delta del río Colorado las biomasa bacterianas estimadas se distribuyeron heterogéneamente, con valores hasta un orden de magnitud mayores en las estaciones de la costa de Baja California que en la costa de Sonora. Esta distribución representaría las diferentes contribuciones de biomarcadores provenientes de microbios en el sedimento. La distribución de la biomasa bacteriana coincide con el gradiente espacial de los AG-FOSFO normalizados por unidad de materia orgánica total. Esto sugiere que los organismos

heterótrofos pueden ser un componente importante del reservorio de carbono en el delta. La distribución de su biomasa, y los grupos de microorganismos que la componen, reflejarían las condiciones ambientales predominantes.

Los bajos porcentajes promedio de ácidos grasos poli-insaturados indican que los microeucariontes son componentes reducidos de la comunidad microbiana sedimentaria; este tipo de condición es común en sedimentos marinos (Findlay y Dobbs, 1993) lo que sugiere un reciclamiento activo de los aportes fitoplanctónicos.

Orozco-Borbón (1995) determinó abundancias bacterianas en la columna de agua, usando conteos con anaranjado de acridina, y reportó diferencias estadísticamente significativas en los valores de bacterias/ml encontradas en la columna de agua en el área del golfo de Santa Clara (4×10^6), San Felipe (2×10^6) y la zona de bifurcación del cauce del río Colorado en la isla Montague (12.5×10^6). Se ha reportado que las estimaciones basadas en conteos directos de bacterias sésiles pueden tener un error del 10% (White, 1988, 1993). La distribución de biomasa bacterianas reportada por Orozco-Borbón (1995) concuerda con las estimaciones de biomasa por AG-FOSFO de este estudio, específicamente, altas biomasa en la zona estuarina y menores en el golfo de Santa Clara. No se determinaron AG-FOSFO en el área de San Felipe.

En el trabajo de Orozco-Borbón (1995) las diferencias significativas entre la zona estuarina, golfo de Santa Clara y San Felipe estuvieron definidas por el control que tienen las corrientes de marea sobre la biomasa bacteriana asociada al seston orgánico. Los valores de productividad bacteriana fueron 3 veces mayores ($17.7 \text{ mg C/m}^3/\text{h}$) que los de productividad primaria para la zona estuarina.

Estos valores contrastan con los valores de productividad bacteriana de las zonas oceánicas de San Felipe y Santa Clara, que fueron aproximadamente un orden de magnitud menores que los reportados para la productividad primaria (24.5 mgC/m³/h). Estas diferencias reportadas y la distribución de las biomásas estimadas por AG-FOSFO, sugieren que las corrientes de marea que resuspenden sedimento y que definirían los aportes orgánicos marinos y terrígenos, pueden ser un factor central en el reciclamiento del carbono en este ecosistema.

En el delta del río Colorado se han encontrado bajos valores de saturación de oxígeno (59%) y altas biomásas bacterianas asociados a resuspensión del sedimento (Martínez-Rojas-Reynoso, 1990; Orozco-Borbón, 1995). En otros estudios, se ha encontrado una disminución de biomasa bacteriana en relación con la distancia con la distancia fuera a la costa, donde la resuspensión del sedimento es menor (Rajendran *et al.*, 1992). Este patrón espacial se mantiene hasta las cuencas profundas, que pueden tener hasta tres veces menos biomasa bacteriana que los sedimentos localizados en zonas costeras (Baird *et al.*, 1985).

El movimiento de masas de agua y sedimento en la zona deltaica está regido principalmente por las mareas, que generan grandes cantidades de sedimento en suspensión (Cupúl-Magaña, 1994; Zamora-Casas, 1993). La hidrodinámica propuesta por estos autores coincide con la distribución de la biomasa bacteriana en los sedimentos superficiales del delta, esto sugiere que las zonas directamente influenciadas por los sedimentos provenientes de la cuenca estuarina mantienen condiciones que favorecen mayores biomásas bacterianas.

Los microheterótrofos juegan un papel central en la composición del carbono sedimentario en el delta. El ácido graso 10Me16:0 que es bioespecífico de *Desulfobacter* spp. (Dowling *et al.*, 1986) y los iso y anteiso 15:0 que se han reportado para *Legionella* spp., *Bacillus* spp. y *Cellulomonas* spp. (Gillan y Hogg, 1984), contribuyeron casi al 30% de los ácidos grasos ramificados reportados en este estudio. Gillan y Hogg (1984) han reportado hasta 60% de los ácidos grasos ramificados para sedimentos intermareales en ambientes de manglares.

Los ácidos grasos monoinsaturados contribuyeron con el 21% a los ácidos grasos de fosfolípidos en los sedimentos marinos del área de estudio. La composición de estos ácidos grasos monoinsaturados fue mayor en el intervalo de C12 a C19, que son indicativos de bacterias gram negativas (Kates, 1986). En nuestro estudio la contribución de ácidos grasos C16:1w9t fue importante, sugiriendo la presencia de bacterias que utilizan metano (Makula, 1978). Por otro lado, los AG *cis* contribuyeron en proporciones equiparables a los *trans* (Tabla 7). El AG monoinsaturado C16:1w9Z es característico de bacterias *Vibrio* y el C18:1w11Z es biomarcador de *Rhodopseudomonas spheroides* (Gillan y Hogg, 1984). Sin embargo, algunos monoenoicos (C16:1w9 y C18:1w9) también pueden ser aportados por microalgas y por copépodos (Gillan y Hogg, 1984).

La presencia de altos porcentajes de AG-FOSFO ramificados y monoinsaturados (50%) y bajos porcentajes de poli-insaturados (11.5%) y saturados mayores de 20 carbonos, indica que las bacterias son los principales contribuyentes de ácidos grasos a los sedimentos superficiales del delta del río Colorado y, por tanto, se infiere que es la fuente predominante de los ácidos grasos monoenoicos (v.g. C16:1w9 y C18:1w9) en estos sedimentos. Esto sugiere que el carbono, proveniente de la alta productividad reportada

para esta zona, es rápidamente reciclado en la columna de agua y muy poco de él llega efectivamente al registro sedimentario.

La diferencia en las proporciones relativas de los ácidos grasos monoinsaturados frente a los ramificados, que Gillan y Hogg (1984) reportaron como biomarcadores de bacterias gram (+) y gram (-) respectivamente, se usó para estimar diferentes ambientes en los sedimentos deltáicos. Estas razones fueron menores en las estaciones cercanas a la costa de Baja California. Los heterótrofos anaerobios y sulforeductores (AG ramificados) se encontraron en mayor proporción en el área influenciada por la descarga de la cuenca estuarina que corresponde al canal de Baja California (Cupúl-Magaña, 1994) y el resto de las estaciones agrupadas por el factor 1.

Es posible que la dinámica de aportes orgánicos y su reciclamiento sea mucho más compleja que la hasta ahora descrita. En las estaciones del factor 2 (excepto la estación 4) los ácidos grasos ramificados concurren con porcentajes similares a otros ácidos grasos característicos de bacterias aeróbicas. Los ácidos grasos ciclopropilos han sido encontrados en bacterias gram-negativas (Zelles, 1997) y en sedimentos aeróbicos (Parkers y Taylor, 1983).

Las características hidrológicas del área de estudio indican que los sedimentos están sujetos a resuspensión y deposición por efecto de las corrientes de marea, lo que sugiere la formación de micronichos aeróbicos y anaerobios. El Cy10 tuvo una contribución alta (5%) en la estación 13 frente al estero La Ramada. Esta estación fue caracterizada por la señal más positiva $\delta^{13}\text{C} = -19.3\text{‰}$ (capítulo 3 de este estudio) atribuible al fitoplancton marino (Fry y Wainwright, 1991). El Cy17 presentó contribuciones entre 0.6 y 1.1% en las estaciones 46, 2, 4 y 38, que corresponden al canal y costa de Sonora. En este mismo área

se encontraron altos porcentajes de AG monoinsaturados y poli-insaturados, característicos de bacterias aeróbicas y micro-eucariontes, respectivamente. Guillan y Hogg (1984) reportaron que algunas bacterias son capaces de biosintetizar ácidos grasos ciclopropilos a partir de ácidos monoenoicos, lo que permite sugerir la presencia de bacterias del tipo de *E. coli* en los sedimentos de las estaciones del factor 2.

En los perfiles lipídicos de este estudio las mayores concentraciones de poli-insaturados fueron ácidos grasos mayores de 19 carbonos; especialmente en la estación 4, donde la suma de poli-insaturados fue mayor que 23%. En ambientes óxicos con influencia de aguas oceánicas es común encontrar ácidos grasos poli-insaturados de cadena larga (Baird *et al.*, 1985; Rajendran *et al.*, 1992). Hernández-Ayón *et al.* (1992) y Martínez-Rojas-Reynoso (1990) reportaron bajas concentraciones de nitratos y altos valores de saturación de oxígeno (100%) cerca del golfo de Santa Clara (estación 34). Asimismo, Chávez-Vargas (1997) reportó para este mismo área (cercanas a las estaciones 4 y 34), ácidos grasos de origen fitoplanctónico y menores aportes de AG de origen bacteriano.

Estos resultados indican que hacia la costa de Sonora existen aportes de aguas oxigenadas de origen oceánico, que favorecen la introducción y preservación de los ácidos grasos poli-insaturados característicos de microeucariontes. Findlay *et al.* (1990), en estudios de respuesta de los microorganismos a la perturbación, observaron que un decremento en la disponibilidad del oxígeno en los sedimentos puede causar la pérdida de biomasa microeucariótica, así como el decremento en bacterias aeróbicas y el incremento de bacterias anaerobias y sulforeductoras (v.g. *Legionella* spp., *Bacillus* spp. y

Cellulomonas spp., *Desulfobacter* spp.) que producen biomarcadores como el iso y anteiso C15 y el 10Me16:0 (Dowling *et al.*, 1986; Gillan y Hogg, 1984; White *et al.*, 1979).

En este estudio no se tienen mediciones de potencial redox (Eh) que permitan evaluar las condiciones ambientales en el sedimento superficial; sin embargo, el hecho de que las mayores concentraciones de poli-insaturados sean ácidos grasos mayores de 19 carbonos, y la presencia de biomarcadores de bacterias anaerobias y sulforeductoras en la mayoría de las estaciones, apoya la hipótesis de la coexistencia de microambientes anaerobios y aeróbios. Rajendran (1992), en estudios de sedimentos anóxicos (Eh = -130 mV) altamente contaminados, encontró total ausencia de poli-insaturados mayores de 19 carbonos.

Por otro lado, la perturbación física de los sedimentos por las intensas corrientes de marea (Álvarez-Borrego y Lara-Lara, 1991) y corrientes residuales de marea con máximos de 5 cm/seg (Álvarez-Sánchez, com. pers.) pudiera ser un factor que incrementa la producción bacteriana, así como la heterogeneidad espacial (White *et al.*, 1979). Las perturbaciones pueden generar heterogeneidad en la composición de la materia orgánica, que pueden ir desde 40 cm de profundidad en sedimentos estuarinos a 10 cm en el mar profundo (Baird *et al.*, 1985) lo que apoya la idea de la presencia de microambientes óxicos y anóxicos en estos sedimentos.

Los ácidos grasos de cadena larga (más de 20 carbonos) de la fracción de los fosfolípidos presentaron un porcentaje promedio bajo (7.1%), sugiriendo que la contribución de ácidos grasos de origen terrestre a los sedimentos superficiales en el área de estudio es menor que la contribución de biomarcadores bacterianos y fitoplanctónicos. La determinación analítica de los AG-FOSFO permite que ácidos grasos libres saturados

de cadena larga (v.g. C24) puedan aparecer como ácidos grasos metilados después de una metanólisis alcalina (White, 1993). Los ácidos libres en una muestra típica corresponden al 1 - 3 % de la fracción lipídica neutral (Kates, 1986). Un perfil lipídico proveniente de la fracción polar de fosfolípidos que muestre ácidos grasos saturados mayores que 20 carbonos indicaría una contribución sustantiva de ácidos grasos libres terrígenos y/o hidrólisis enzimática de los enlaces éster con su matriz orgánica antes o durante el proceso de aislamiento analítico (Kates, 1986).

El ácido graso 20:4, que ha sido reportado como biomarcador de diatomeas (Volkman *et al.*, 1980; Smith *et al.*, 1986; Skerrat *et al.*, 1995), fue el más abundante en la costa sonorensis. Canuel y Martens (1993), en estudios de diagénesis, confirmaron que la abundancia de AG poli-insaturados refleja el aporte de material fitoplanctónico reciente a sedimentos superficiales. Es conveniente señalar que las bajas contribuciones de otros ácidos grasos característicos de diatomeas (C20:5, C22:6) sugieren que este biomarcador pueda tener contribuciones de microzooplancton (Najdek, 1993). Sin embargo, la agrupación de AG que se realizó de acuerdo a Findlay y Dobbs (1993) coloca a estos ácidos grasos dentro del grupo característico de microeucariontes.

El hecho de que la prueba de significación de Tukey discrimine espacialmente las clases de los AG-FOSFO, implica que existen condiciones ambientales distintas que definen los tipos de microorganismos que pueden encontrarse en los sedimentos superficiales y que determinan la distribución espacial de ácidos grasos bacterianos en el delta del río Colorado.

Las razones de ácidos grasos monoinsaturados sobre ramificados fueron menores a 1 en las estaciones cercanas a la costa de Baja California. Una razón menor a 1 indica

dominancia de bacterias anaerobias (Rajendran *et al.*, 1992). La aparente predominancia de condiciones anóxicas en estos sedimentos podría estar asociada a la descarga de sedimentos de la cuenca estuarina y a las velocidades de corrientes de marea que ocurren por el canal y costa de Baja California. Sin embargo, puede resultar poco preciso definir un ambiente con base en razones exactas de ácidos grasos, ya que la heterogeneidad de ambientes en la naturaleza puede ser mucho más compleja que lo que se pueda resolver por esta aproximación analítica. Wakeham y Beier (1991) han encontrado presencia de ácidos grasos característicos de condiciones anaerobias estrictas (v.g. *Desulfobacter* sp.) en la columna de agua óxica del Mar Negro.

Las contribuciones de ácidos grasos monoinsaturados *trans* y *cis* pueden ser asociadas al estado fisiológico de los microorganismos (Guckert *et al.*, 1986; Rajendran *et al.*, 1992). Una razón menor a 0.1 es lo comúnmente encontrado para la mayoría de las bacterias (Guillan y Hogg, 1984; Guckert *et al.*, 1985; Rajendran *et al.*, 1992); mientras que una razón mayor a 1 indica la existencia de algún tipo de estrés (Rajendran *et al.*, 1992) o condiciones extremas de inanición (Mancuso *et al.*, 1990). En nuestro área de estudio estas razones fueron consistentemente altas ($\gg 0.1$) con una gran heterogeneidad entre los canales del delta. Las condiciones ambientales del canal de Baja California, que permiten altas concentraciones de 10Me16:0 característico de ambientes anóxicos, podrían haber contribuido a las altas concentraciones de AG *trans*, en contraste con las altas concentraciones de AG-FOSFO *cis* del canal de Sonora que recibe la entrada de aguas oceánicas (Cupúl-Magaña, 1994).

En los sedimentos del área estudiada, la presencia de ácidos grasos totales *trans* fue de tal magnitud que no existen diferencias estadísticamente significativas con los ácidos

grasos *cis* totales. Esto sugiere la presencia de condiciones ambientales extremas, como inanición, bajos niveles de oxígeno, incremento de la temperatura o gran movilidad de sustrato, que promueven la producción de AG *trans* (Findaly y Dobbs, 1993). La resuspensión y depositación del sedimento es característica de la zona del Alto Golfo de California.

5.4. Conclusiones.

La biomasa y estructura microbiana de la zona de estudio pudo ser evaluada mediante el perfil lipídico de los ácidos grasos de fosfolípidos, en muestras de sedimentos superficiales. La determinación de las clases de ácidos grasos de fosfolípidos permitió observar la dominancia relativa de grupos de microorganismos que representan condiciones ambientales particulares.

La distribución espacial de las clases de ácidos grasos fue fundamentada por los resultados del análisis factorial. Los grupos de estaciones fueron significativamente diferentes entre sí, indicando que son representativos de las condiciones ambientales que los diferencian.

La contribución de los ácidos grasos poli-insaturados y monoinsaturados discrimina, con significación estadística, la costa de Sonora de los otros grupos de estaciones resultado del análisis factorial. Esta distribución indica la localización de un ambiente sedimentario bien definido, caracterizado por altos aportes de ácidos grasos de origen microeucariótico y por condiciones suficientemente aeróbicas que permiten la presencia de AG monoinsaturados característicos de microheterótrofos aeróbicos.

La discriminación estadística de las clases de ácidos grasos ramificados, saturados pares e impares en los sedimentos superficiales de la costa de Baja California refleja una compleja interacción entre la estructura bacteriana y las condiciones ambientales. El complejo ciclo de resuspensión-deposición de sedimentos orgánicos, por efecto de las mareas, debe tener una respuesta en la estructura bacteriana que puede encontrarse en ese ambiente. Por esto se sugiere la influencia de la descarga de agua y sedimento por el canal y costa de Baja California, como uno de los factores que caracterizan la contribución de ácidos grasos bacterianos y sus diferencias estadísticas en la escala espacial.

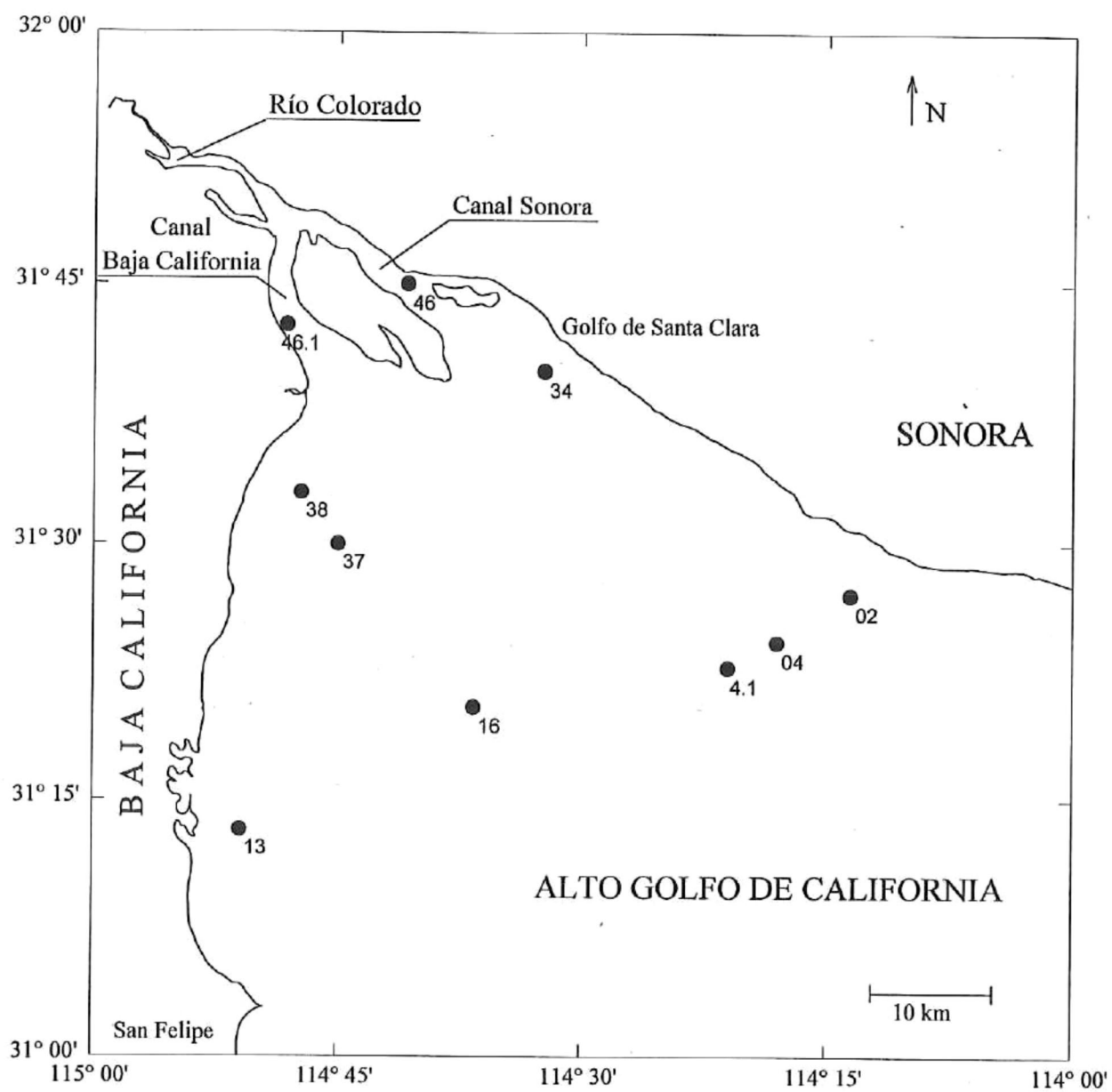


Figura 5.1. Estaciones muestreadas para determinar AG-FOSFO en sedimentos superficiales del delta del río Colorado.

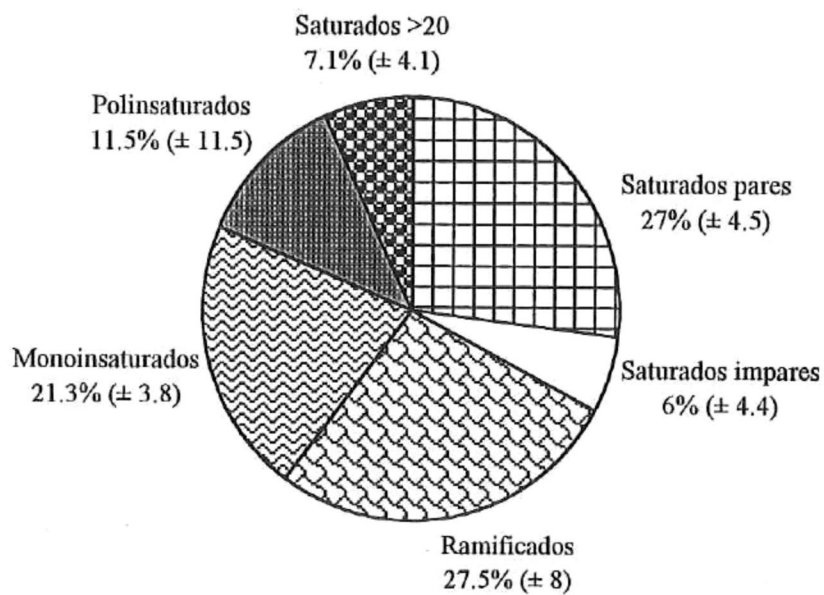


Figura 5.2. Porcentajes promedio y desviación estandar de clases de AG-FOSFO en sedimentos superficiales del delta del río Colorado.

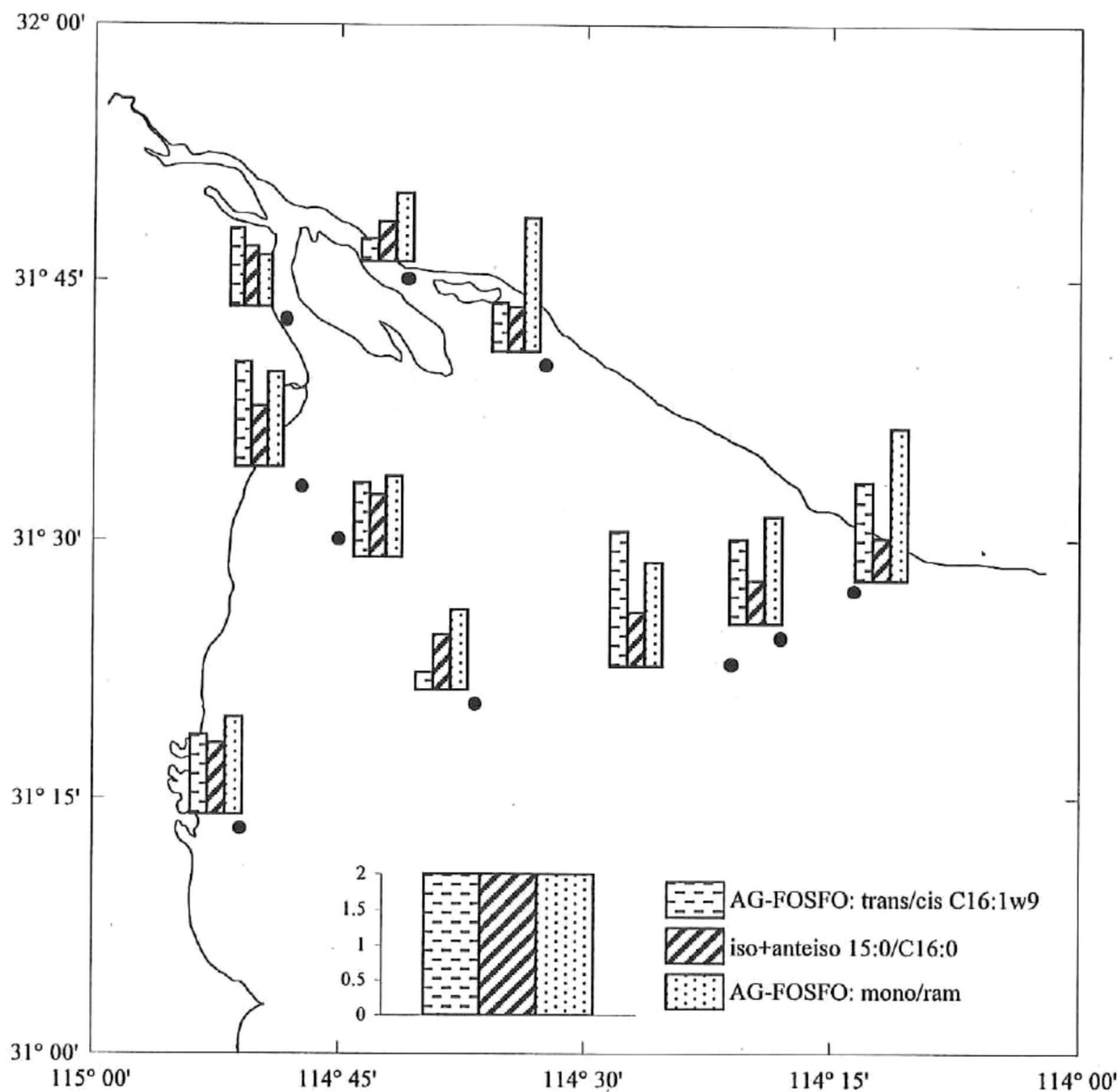


Figura 5.3. Distribución de las razones de AG-FOSFO en sedimentos superficiales del delta del río Colorado.

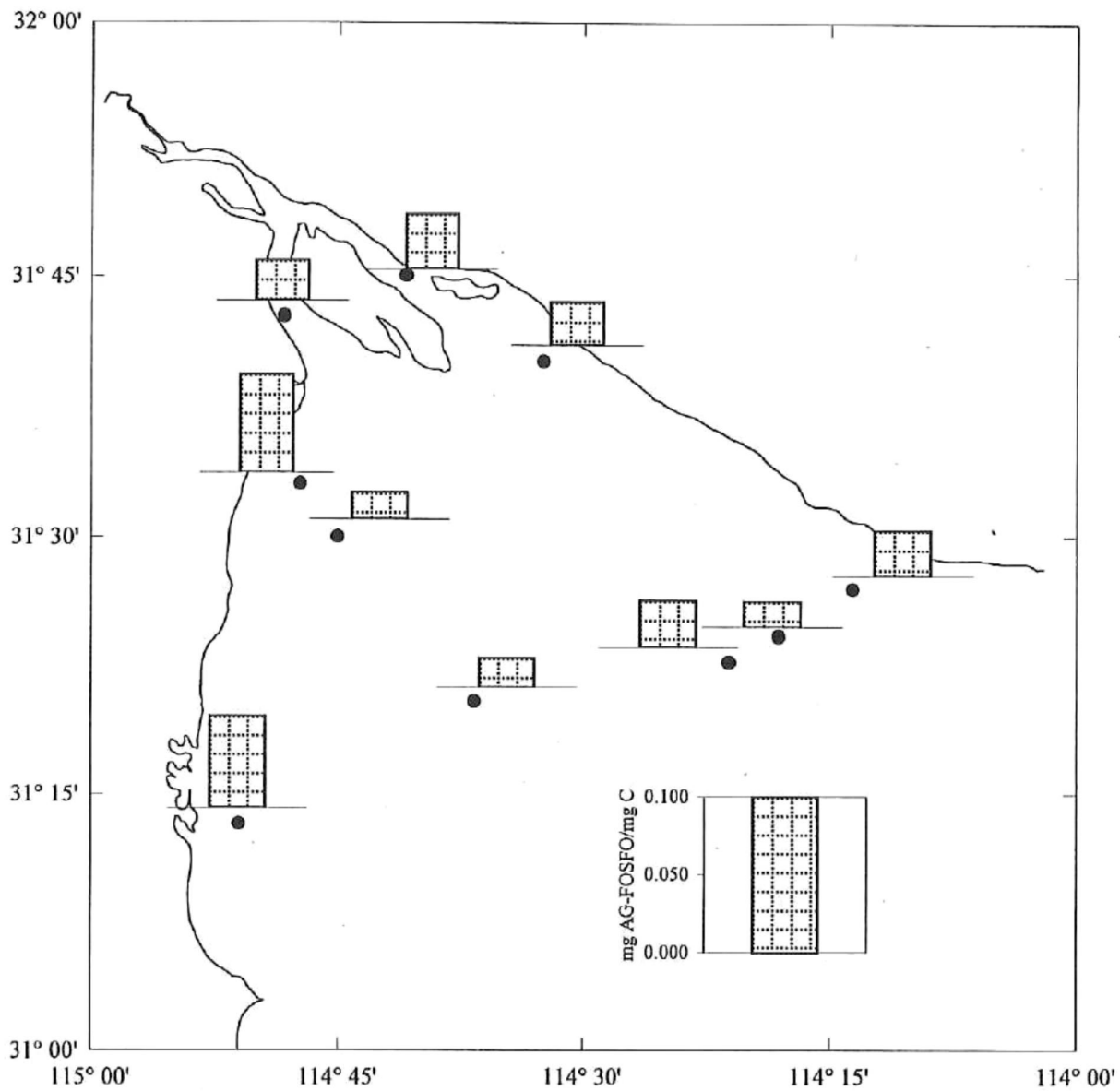


Figura 5.4. Distribución de AG-FOSFO en sedimentos superficiales del delta del río Colorado.

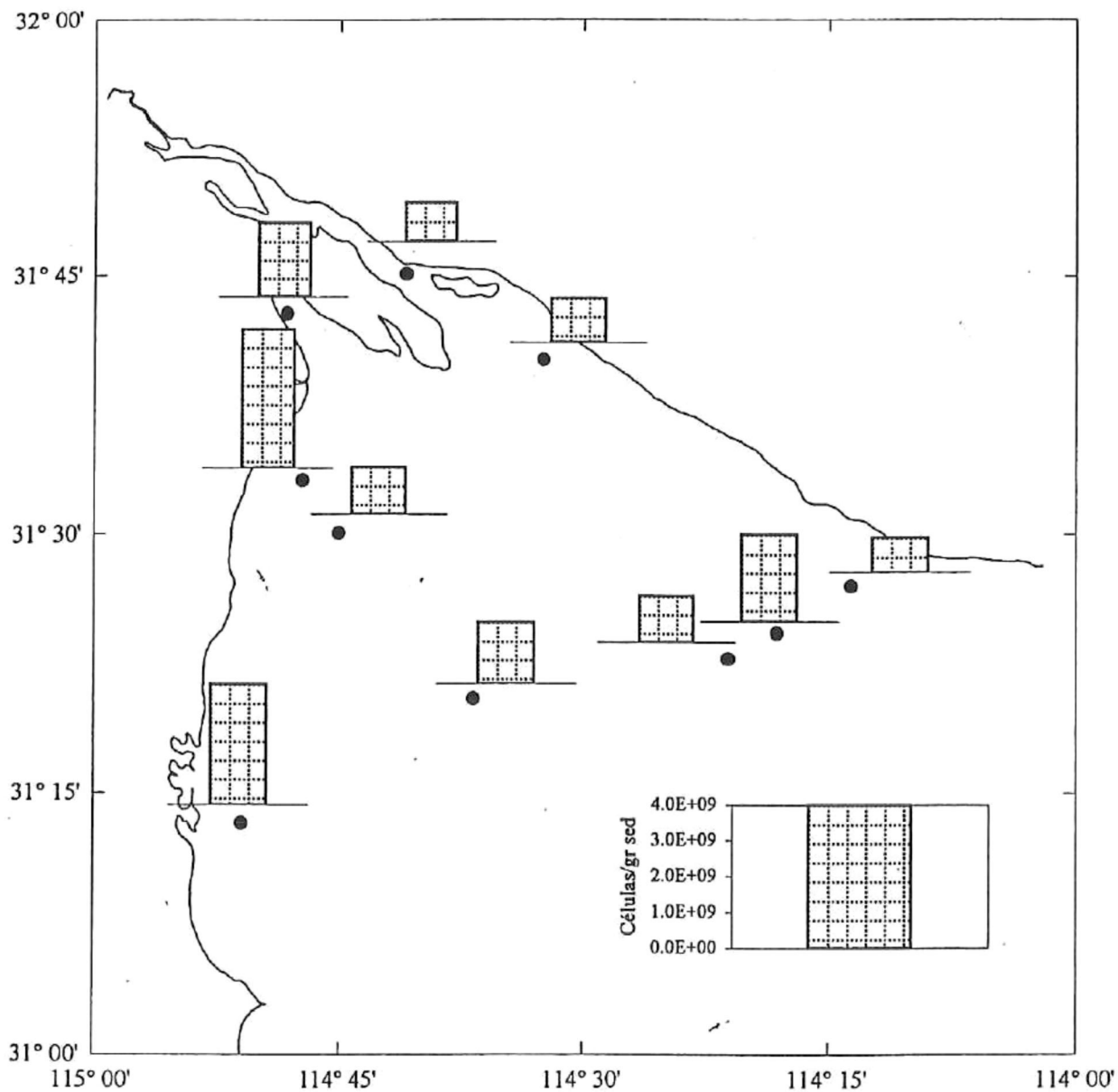


Figura 5.5. Distribución de la Biomasa bacteriana calculada a partir de los AG-FOSFÓ en sedimentos superficiales de la Reserva de la Biosfera del Delta del Río Colorado.

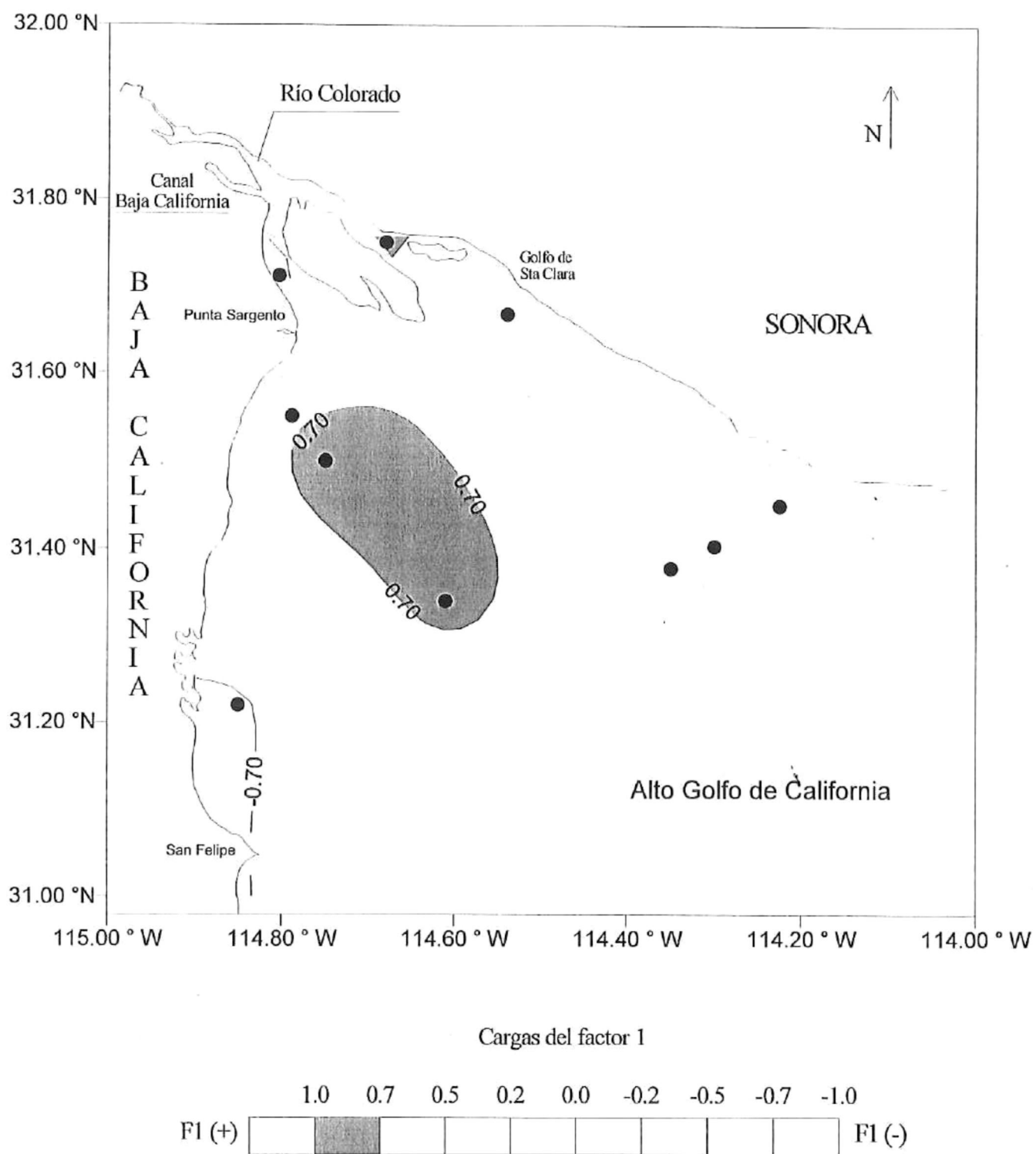


Figura 5.7. Isolíneas de las cargas del factor 1 que muestra los agrupaciones de las estaciones en el delta del río Colorado. Los puntos negros indican las estaciones muestreadas.

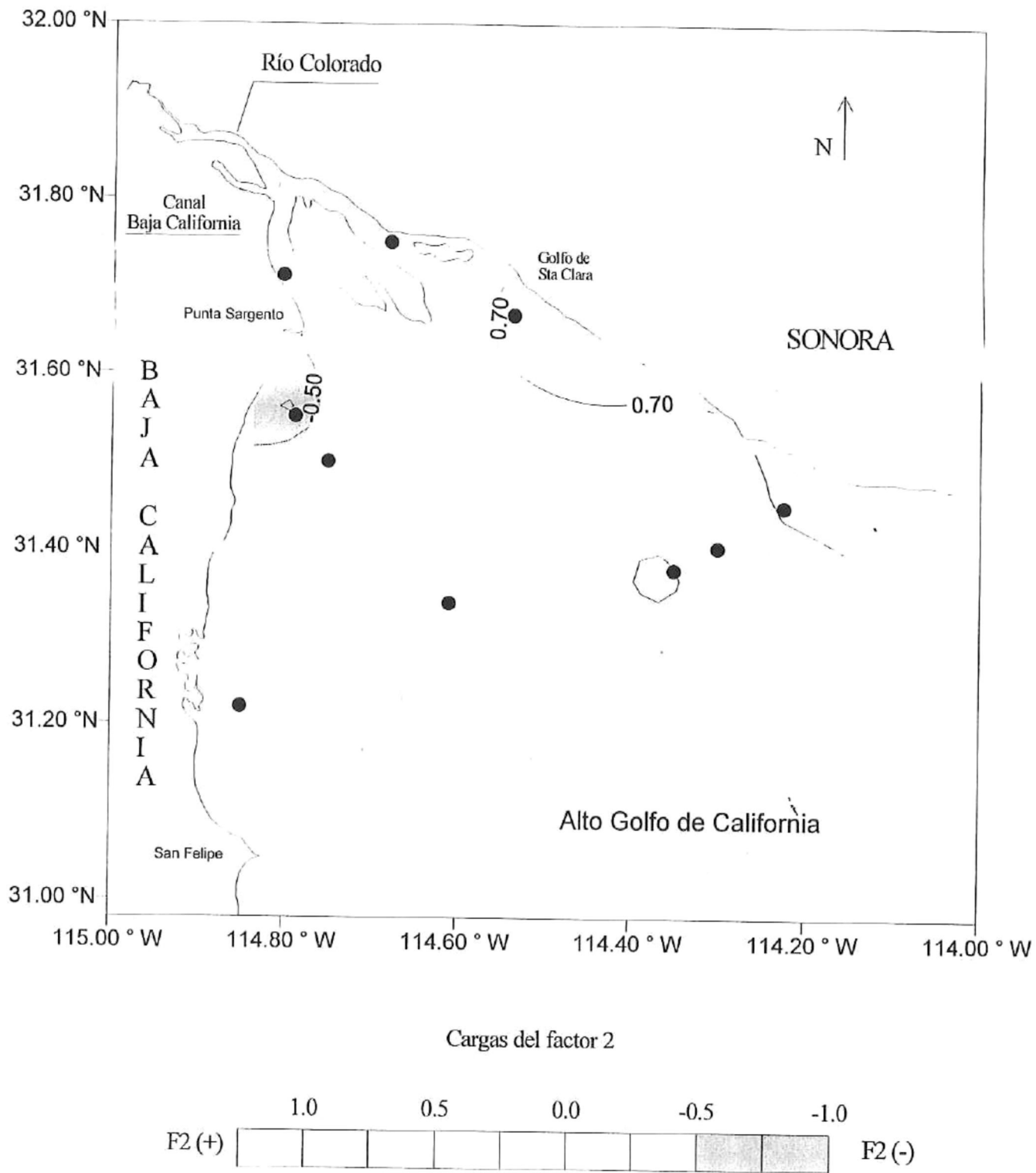


Figura 5.8. Isolíneas de las cargas del factor 2 que muestra los agrupaciones de las estaciones en el delta del río Colorado. Los puntos negros indican las estaciones muestreadas.

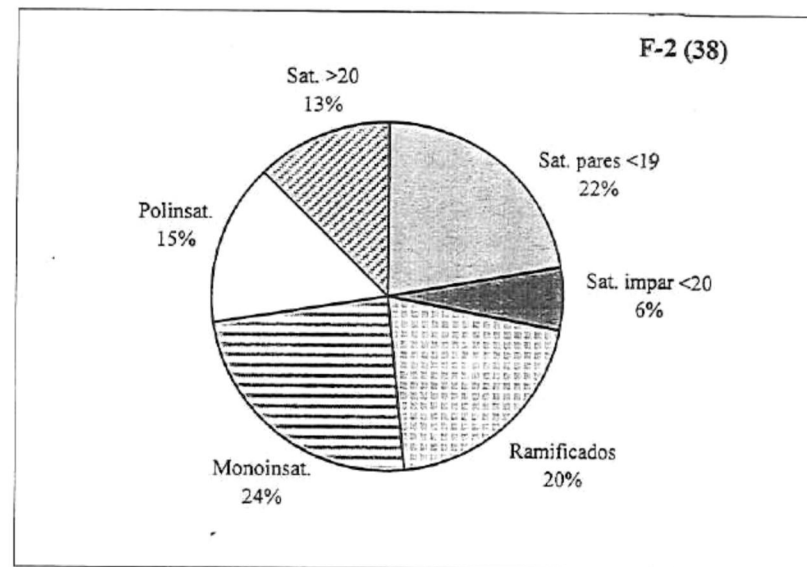
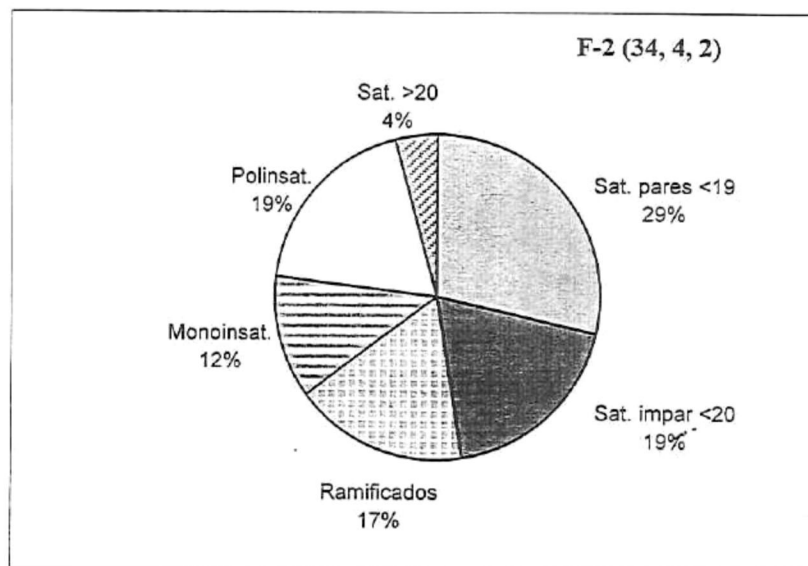
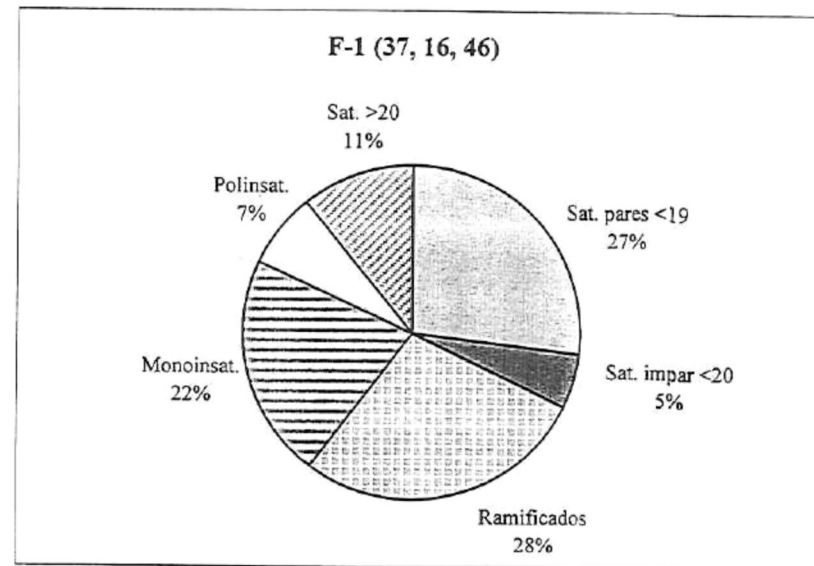
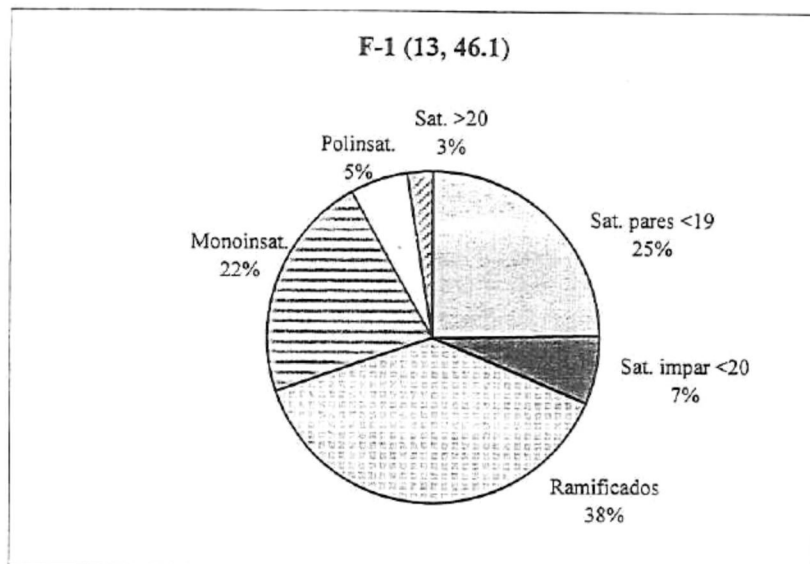


Figura 5.9 Clases de AG-FOSFO de los Factores 1 y 2 (modo -Q) en el delta del río Colorado.

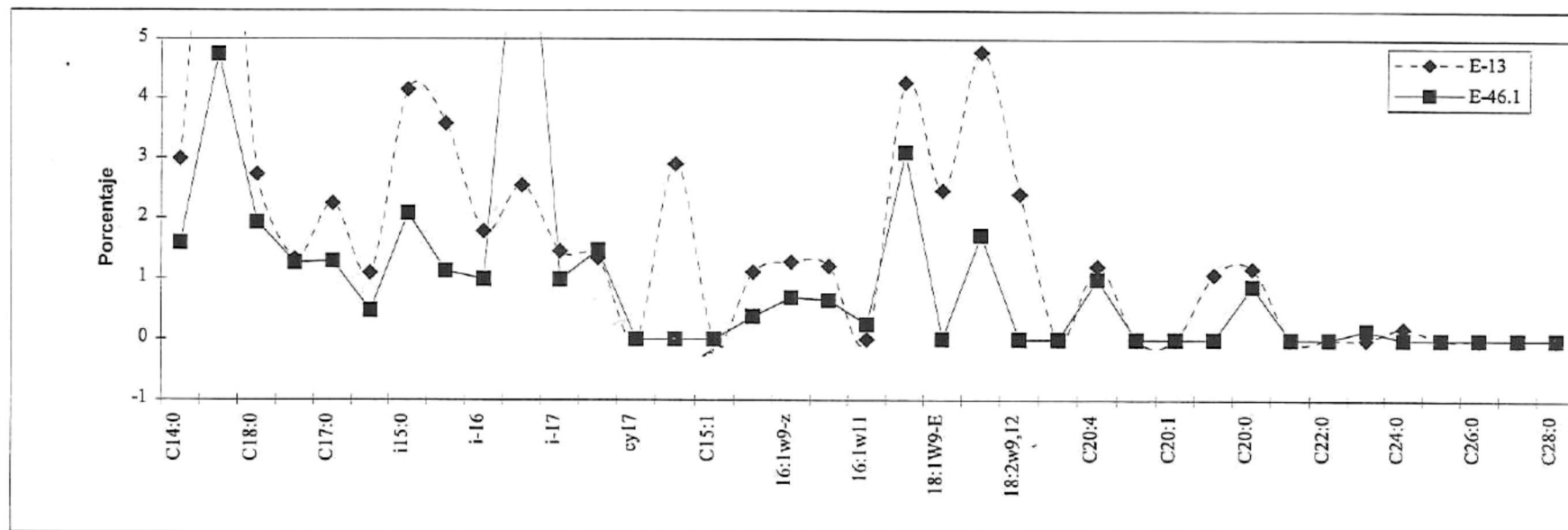
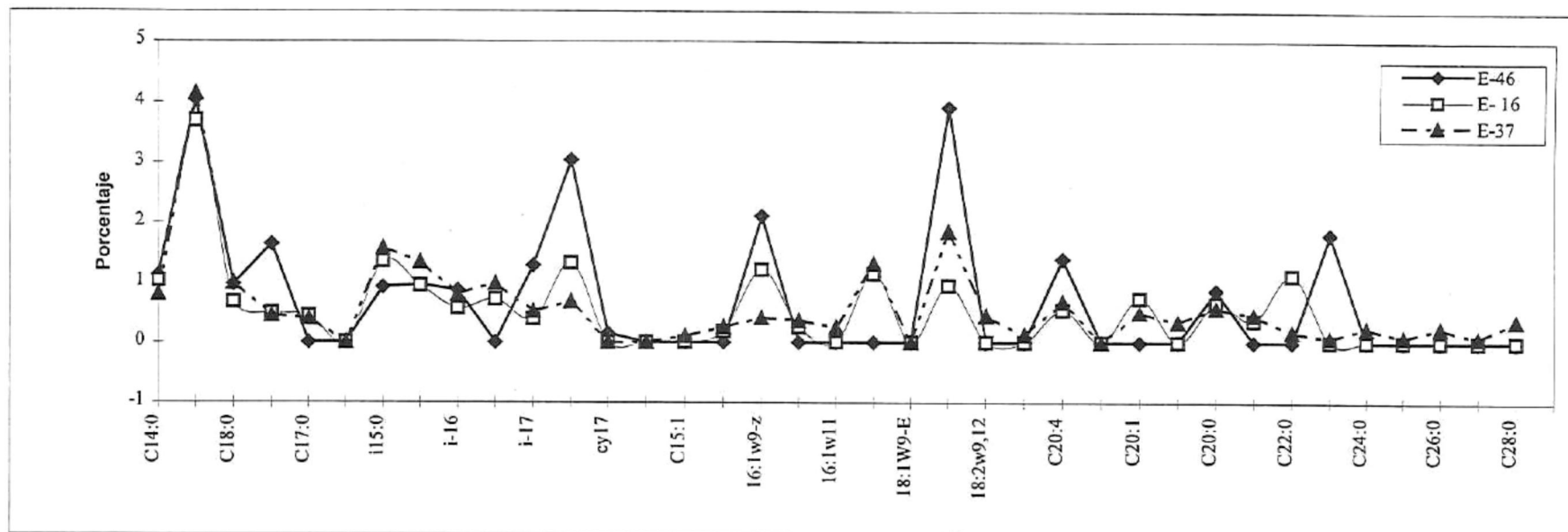


Figura 5.10. Porcentajes de AG-FOSFO individuales presentes en las estaciones agrupadas por el factor 1 en el delta del río Colorado.

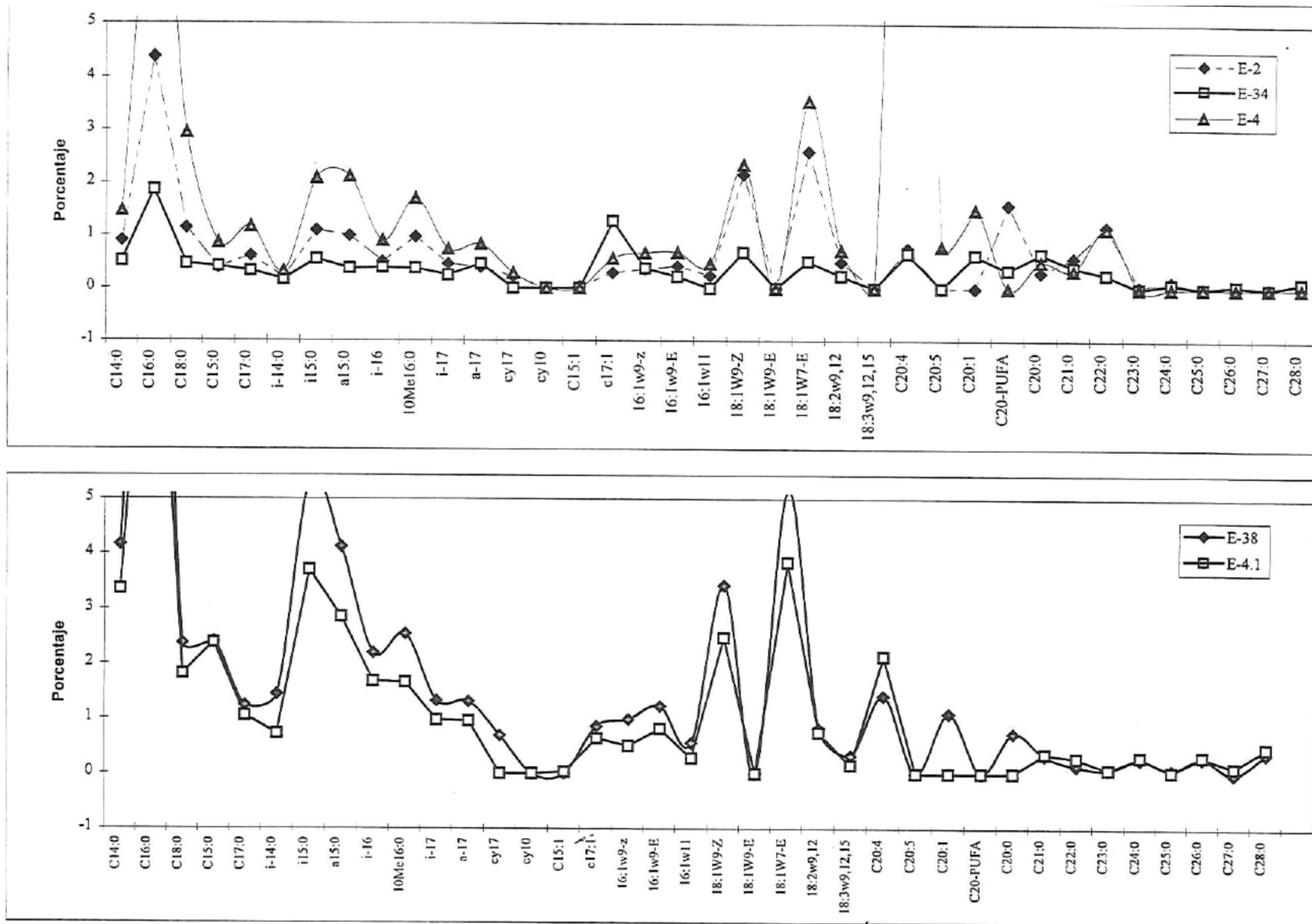


Figura 5.11. Porcentajes de AG-FOSFO individuales presentes en las estaciones agrupadas por el factor 2 en el delta del río Colorado

TABLA 5.1. Porcentajes de ácidos grasos de fosfolípidos en sedimentos superficiales de delta del río Colorado.

| | E-46 | E-46.1 | E-37 | E-13 | E- 16 | E-34 | E-38 | E-4 | E-2 | E-4.1 |
|---------------------------|------|--------|------|------|-------|------|------|------|------|-------|
| saturados pares <19 | | | | | | | | | | |
| C14:0 | 4.5 | 4.5 | 3.8 | 5.1 | 5.5 | 4.0 | 6.8 | 2.5 | 3.9 | 7.4 |
| C16:0 | 16.1 | 13.4 | 19.2 | 16.4 | 19.7 | 14.6 | 22.8 | 14.3 | 18.6 | 23.8 |
| C18:0 | 3.9 | 5.5 | 4.6 | 4.6 | 3.6 | 3.6 | 3.9 | 4.9 | 4.9 | 4.0 |
| TOTAL | 25 | 23 | 28 | 26 | 29 | 22 | 34 | 22 | 27 | 35 |
| saturados impares <20 | | | | | | | | | | |
| C15:0 | 6.5 | 3.6 | 2.1 | 2.2 | 2.6 | 3.2 | 3.9 | 1.5 | 1.7 | 5.2 |
| C17:0 | | 3.6 | 1.8 | 3.8 | 2.4 | 2.6 | 2.0 | 2.0 | 2.6 | 2.3 |
| TOTAL | 7 | 7 | 4 | 6 | 5 | 6 | 6 | 3 | 4 | 8 |
| ramificados+cíclicos | | | | | | | | | | |
| i-14:0 | | 1.3 | | 1.9 | | 1.3 | 2.4 | 0.5 | 0.8 | 1.6 |
| i15:0 | 3.7 | 5.9 | 7.3 | 7.0 | 7.2 | 4.3 | 8.7 | 3.5 | 4.7 | 8.1 |
| a15:0 | 3.8 | 3.2 | 6.2 | 6.1 | 5.0 | 2.9 | 6.7 | 3.5 | 4.2 | 6.3 |
| i16:0 | 3.5 | 2.8 | 3.7 | 3.0 | 3.0 | 3.1 | 3.6 | 1.5 | 2.1 | 3.7 |
| 10Me16:0 | | 24.5 | 4.5 | 4.3 | 3.8 | 3.0 | 4.2 | 2.9 | 4.2 | 3.7 |
| i17:0 | 5.1 | 2.8 | 2.4 | 2.5 | 2.1 | 2.0 | 2.2 | 1.3 | 2.0 | 2.1 |
| a17:0 | 12.1 | 4.2 | 3.1 | 2.3 | 7.1 | 3.7 | 2.1 | 1.4 | 1.7 | 2.1 |
| cy17:0 | 0.6 | | | | | | 1.1 | 0.5 | 0.9 | |
| cy(3)-10 | | | | 4.9 | | | | | | |
| TOTAL | 29 | 45 | 27 | 32 | 28 | 20 | 31 | 15 | 21 | 28 |
| monoinsaturados < 20 | | | | | | | | | | |
| C15:1 | | | 0.5 | | | | | | 0.2 | |
| C16:1w7 | | | | | | | | | | |
| C17:1 | | 1.1 | 1.1 | 1.9 | 1.0 | 10.1 | 1.4 | 1.0 | 1.3 | 1.4 |
| C16:1w9-z | 8.4 | 1.9 | 1.9 | 2.2 | 6.4 | 3.0 | 1.6 | 1.1 | 1.6 | 1.1 |
| C16:1w9-E | 2.4 | 1.8 | 1.7 | 2.1 | 1.3 | 1.7 | 2.0 | 1.2 | 1.8 | 1.8 |
| C16:1w11 | | 0.7 | 1.2 | | | | 0.9 | 0.8 | 1.0 | 0.6 |
| C18:1W9-Z | | 8.8 | 6.1 | 7.2 | 6.1 | 5.4 | 5.6 | 3.9 | 9.2 | 5.4 |
| C18:1W9-E | | | | 4.2 | | | | \ | | |
| C18:1W7-E | 15.6 | 4.8 | 8.6 | 8.1 | 5.0 | 4.1 | 8.4 | 5.9 | 11.0 | 8.5 |
| TOTAL | 24 | 19 | 21 | 26 | 20 | 24 | 20 | 14 | 26 | 19 |
| Polinsaturados (PUFA) | | | | | | | | | | |
| C18:2w9,12 | | | 2.1 | 4.1 | | 1.9 | 1.3 | 1.2 | 2.1 | 1.6 |
| C18:3w9,12,15 | | | 0.6 | | | | 0.5 | | 0.0 | 0.3 |
| C20:4 | 5.6 | 2.8 | 3.2 | 2.1 | 2.9 | 5.2 | 2.3 | 37.5 | 3.3 | 4.7 |
| C20:5 | | | | | | | | 1.3 | | |
| C20:1 | | | 2.3 | | 3.9 | 5.0 | 1.8 | 2.5 | | |
| C20-PUF | | | 1.6 | 1.8 | | 2.7 | | | 6.8 | |
| TOTAL | 6 | 3 | 10 | 8 | 7 | 15 | 6 | 43 | 12 | 7 |
| Sat. caden. larga >20 | | | | | | | | | | |
| C20:0 | 3.5 | 2.5 | 2.6 | 2.0 | 3.4 | 5.2 | 1.2 | 0.9 | 1.3 | |
| C21:0 | | | 2.1 | | 1.9 | 3.2 | 0.5 | 0.6 | 2.5 | 0.8 |
| C22:0 | | | 0.8 | | 5.9 | 2.1 | 0.2 | 1.9 | 5.0 | 0.6 |
| C23:0 | 7.2 | 0.4 | 0.3 | | | | 0.1 | | 0.2 | 0.2 |
| C24:0 | | | 1.1 | 0.3 | | 0.7 | 0.4 | | 0.6 | 0.7 |
| C25:0 | | | 0.4 | | | | 0.1 | | | 0.1 |
| C26:0 | | | 1.1 | | | 0.5 | 0.5 | | | 0.7 |
| C27:0 | | | 0.3 | | | | 0.0 | | | 0.3 |
| C28:0 | | | 1.7 | | | 0.9 | 0.6 | | | 1.0 |
| TOTAL | 11 | 3 | 10 | 2 | 11 | 13 | 4 | 3 | 10 | 4 |
| %TOTAL-AG-FOSFO | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| ag-fosfo (µg/gr sed seco) | 4.3 | 5.6 | 2.5 | 15.1 | 2.7 | 1.5 | 17.3 | 4.8 | 1.9 | 8.5 |

Tabla 5.2. Carga y varianza de los factores de cada variable en los sedimentos superficiales de de delta del río Colorado

| Estaciones | Factor 1 | Factor 2 |
|----------------------|----------|----------|
| E46 | 0.816 | -0.497 |
| E46.1 | -0.903 | -0.312 |
| E38 | 0.617 | -0.753 |
| E34 | 0.021 | 0.948 |
| E37 | 0.957 | 0.009 |
| E13 | -0.806 | 0.325 |
| E16 | 0.890 | -0.397 |
| E4.1 | 0.166 | -0.622 |
| E4 | 0.021 | 0.901 |
| E2 | -0.265 | 0.883 |
| Eigenvalor | 5.691 | 2.691 |
| % Varianza total | 56.9 | 26.9 |
| % Varianza acumulada | 56.9 | 83.8 |

Tabla 5.3. Prueba de homogeneidad de varianza para los Factores 1 y 2, positivos y negativos.

| F1(+), F1(-), F2(+), F2(-) | Efecto | Error | F(1,7) | p* |
|----------------------------|--------|-------|--------|-------|
| Saturados pares | 1.484 | 0.794 | 1.869 | 0.252 |
| Saturados impares | 0.270 | 0.383 | 0.705 | 0.589 |
| Ramificados | 35.744 | 4.693 | 7.617 | 0.260 |
| Monoinsaturados | 42.568 | 7.540 | 5.645 | 0.462 |
| Polinsaturados | 24.529 | 5.252 | 4.670 | 0.651 |
| Saturados > 20 | 4.794 | 1.613 | 2.972 | 0.136 |

*p: nivel de significancia = 0.05

Tabla 5.4. Prueba ANVAMU de λ de Wilks y R de Rao para los factores 1 y 2.

| Efecto | λ de Wilks | R de Rao | g.l. (1) | g.l. (2) | p* |
|--------------------------------|--------------------|-----------|----------|----------|--------|
| F1 vs F2 | 0.209 | 146.625 | 6 | 233 | 0.001 |
| F1(+), F1(-), F2(+), F2(-). | 0.000 | 3.29 E 07 | 18 | 653 | 0.0001 |

*p: nivel de significancia = 0.05

Tabla 5.5. Prueba de honestidad de Tukey para los factores 1 y 2.

| AG-FOSFO | Factor | F1(+) | F1(-) | F2(+) |
|----------------------|--------|--------|--------|--------|
| Monoinsaturados | F1(-) | 0.754 | | |
| | F2(+) | 0.015* | 0.002* | |
| | F2(-) | 0.555 | 0.185 | 0.737 |
| Polinsaturados | F1(-) | 0.111 | | |
| | F2(+) | 0.000* | 0.000* | |
| | F2(-) | 0.439 | 0.973 | 0.000* |
| Ramificados | F1(-) | 0.000* | | |
| | F2(+) | 0.000* | 0.000* | |
| | F2(-) | 0.050* | 0.000* | 0.000* |
| Saturados impares | F1(-) | 0.000* | | |
| | F2(+) | 0.000* | 0.000* | |
| | F2(-) | 0.050 | 0.006 | 0.000* |
| Saturados pares | F1(-) | 0.000* | | |
| | F2(+) | 0.000* | 0.114 | |
| | F2(-) | 0.050* | 0.006* | 0.000* |
| Saturados pares > 20 | F1(-) | 0.000* | | |
| | F2(+) | 0.000* | 0.000* | |
| | F2(-) | 0.050* | 0.032* | 0.000* |

* diferencia estadísticamente significativa, $\alpha = 0.05$

Tabla 5.6. Porcentajes de las clases de AG-FOSFO de los factores 1 y 2 en sedimentos superficiales del delta del río Colorado.

FACTOR 1 (56.9 % de variancia)

| | Sat. par | Sat. impares | Ramificado | Monoinsaturados | Polinsaturados | Ssat. >20 | trans/cis16:1w9 | i,a15:0/C16:0 | mono/ram |
|-----------------|-------------|--------------|-------------|-----------------|----------------|------------|-----------------|---------------|-------------|
| E-46 | 25 | 7 | 29 | 24 | 6 | 11 | 0.31 | 0.46 | 0.83 |
| E-46.1 | 23.3 | 7.2 | 44.6 | 19.1 | 2.8 | 2.9 | 0.9 | 0.68 | 0.43 |
| E-37 | 27.6 | 3.9 | 27.3 | 21.0 | 9.7 | 10.4 | 0.9 | 0.70 | 0.77 |
| E-13 | 26.1 | 6.1 | 32.0 | 25.6 | 8.0 | 2.3 | 0.9 | 0.80 | 0.80 |
| E- 16 | 28.8 | 5.0 | 28.3 | 19.9 | 6.8 | 11.3 | 0.2 | 0.62 | 0.70 |
| promedio | 26.1 | 5.7 | 32.2 | 21.9 | 6.6 | 7.5 | 0.66 | 0.65 | 0.71 |

FACTOR 2 (26.9 % de variancia)

| | | | | | | | | | |
|-----------------|-------------|------------|-------------|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| E-34 | 22.3 | 5.8 | 20.2 | 24.3 | 14.8 | 12.6 | 0.6 | 0.50 | 1.20 |
| E-38 | 33.5 | 6.0 | 30.9 | 20.0 | 6.0 | 3.7 | 1.2 | 0.67 | 0.65 |
| E-4 | 21.7 | 3.1 | 15.1 | 13.9 | 42.6 | 3.3 | 1.0 | 0.49 | 0.92 |
| E-2 | 27.3 | 4.3 | 20.7 | 26.0 | 12.2 | 9.5 | 1.2 | 0.48 | 1.26 |
| promedio | 26.2 | 4.8 | 21.7 | 21.1 | 18.9 | 7.3 | 1.00 | 0.54 | 1.01 |

6. CONCLUSIONES.

La determinación de la variación de la composición orgánica sedimentaria permitió evaluar las principales fuentes orgánicas y su distribución espacial en el delta del río Colorado. Se analizaron isótopos estables y composición elemental de carbono y nitrógeno, ácidos grasos totales y ácidos grasos de fosfolípidos en la matriz orgánica sedimentaria.

La evaluación múltiple de biomarcadores lipídicos y trazadores moleculares permitió identificar que las principales fuentes orgánicas en el área son los aportes de origen marino, la contribución de organismos microheterótrofos y el material orgánico terrígeno. Las contribuciones de las diferentes fuentes orgánicas presentaron diferencias estadísticamente significativas entre ambas costas del delta. Los sedimentos superficiales de la costa sonoreense mostraron aportes orgánicos de origen fitoplanctónico, aunque también se detectaron aportes de fuentes bacterianas. En contraste, en la costa de Baja California el reservorio de la materia orgánica sedimentaria estuvo dominado por aportes de organismos heterótrofos, con algunos puntos aislados de materiales zooplanctónicos y terrígenos importantes.

La ausencia de aportes del río y el patrón hidrodinámico dominante en el área de estudio provoca que la composición orgánica que se registra en la actual matriz sedimentaria defina zonas biogeoquímicas que varían lateralmente en el área de estudio. Estas zonas representarían condiciones ambientales donde la interacción de los procesos biológicos, químicos y geológicos definen el destino de los flujos de materiales y energía.

Costa de Sonora.

En los sedimentos superficiales de la costa de Sonora, los resultados de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ presentaron un gradiente de sur a norte que se incrementa a valores promedio menos negativos de $\delta^{13}\text{C}$ (-20.3‰ a -19.7‰), $\delta^{15}\text{N}$ (8.2‰ a 10.9‰), razón C/N (6.6 a 7.5) y mayores tamaños de grano medio (3.7 a 2.8 phi), estableciendo que el origen del nitrógeno y carbono orgánico en los sedimentos superficiales de esta zona es materia orgánica predominantemente fitoplanctónica.

Los ácidos grasos en los sedimentos permitieron discriminar la composición de las fuentes marinas predominantes, ya que, además de la presencia de biomarcadores fitoplanctónicos, se detectaron fuentes orgánicas de origen bacteriano y zooplanctónico. En la costa de Sonora, los ácidos grasos polienólicos de 20 y 22 carbonos, que son típicos de diatomeas y los polienólicos de 18 carbonos, típicos de prymnesiofitas y dinoflagelados, y el monoinsaturado C16:1w7, atribuido al fitoplancton contribuyeron con el 45% de los ácidos grasos evaluados en esta zona. Los ácidos grasos monoinsaturados de origen bacteriano representaron el 25% y el ácido graso C18:1w9, característico de copépodos contribuyó con el 19% de los ácidos grasos zooplanctónicos en la costa de Sonora. Los altos porcentajes ácidos grasos provenientes de zooplancton y de bacterias sugiere procesos de pastoreo y degradación bacteriana sobre un sustrato fitoplanctónico.

La distribución de los grupos de estaciones sigue el patrón anticiclónico del transporte de sedimento y de corrientes residuales en el delta. Esto indica la procedencia de las fuentes orgánicas autóctonas que se reflejan en la matriz orgánica sedimentaria en el delta. Los ácidos grasos provenientes de fosfolípidos permitieron discriminar la estructura

bacteriana y definir que en los sedimentos superficiales de la costa de Sonora existen condiciones aerobias suficientes para permitir la presencia de ácidos grasos monoinsaturados, característicos de microheterótrofos aeróbicos que definen altas razones de ácidos grasos monoinsaturados/ramificados. Las bajas razones de *iso* y *anteiso* C15/C16 indicaron la localización de un ambiente sedimentario, estadísticamente definido, caracterizado por altos aportes de ácidos grasos de origen microeucariótico.

La caracterización molecular y la de biomarcadores lipídicos definieron estadísticamente a la costa sonorenses de una manera mucho más delimitada que la costa bajacaliforniana. Es claro que, la intrusión de agua oceánica con aportes orgánicos marinos determina la composición orgánica microautótrofa de los sedimentos en la costa sonorenses. En contraste, hacia la costa de Baja California concurren fuentes orgánicas y condiciones ambientales que involucran mezclas y complicados procesos de reciclamiento de materiales.

Costa de Baja California.

La zona aquí denominada costa de Baja California comprende principalmente la zona de la descarga de la cuenca estuarina. En este área el patrón de las corrientes residuales es más complejo que en la costa de Sonora. Aparentemente el agua oceánica que entra por la costa de Sonora se combina con la descarga de la cuenca estuarina, formando complejas mezclas orgánicas en la matriz sedimentaria.

En la zona río arriba, el diámetro de las partículas es mayor (2.8 phi), lo que es consistente con altas razones C/N y $\delta^{13}\text{C}$ negativos; mientras que para la cuenca estuarina del lado de Baja California y plataforma oceánica adyacente se presentó un gradiente norte

a sur con valores promedio de $\delta^{13}\text{C}$ (-22.1‰ a -20.8‰), $\delta^{15}\text{N}$ (10.5‰ a 8.5‰), razón C/N (11.3 a 6.8) y menores tamaños de grano medio (4.7 a 6.8 phi). Estos valores indican la influencia de material terrígeno orgánico, que seguramente proviene del depósito deltáico, y que se mezcla con los aportes marinos de acuerdo al patrón de circulación mencionado.

El hecho de que el $\delta^{13}\text{C}$ tienda hacia valores menos negativos (-20.2‰) cuando el diámetro de los sedimentos disminuye a limos y arcillas (7.6 phi) y el porcentaje de carbono aumenta, sugiere que las bajas velocidades de corriente residual (<1 cm/seg) de este microambiente permiten que los aportes autóctonos (fitoplancton y zooplancton) puedan mezclarse con tamaños de partículas muy finos provenientes de la descarga de la cuenca estuarina. Este mecanismo, aunado a los procesos de oxidación de la materia orgánica, explicaría los bajos valores de $\delta^{15}\text{N}$ y razón C/N.

Los ácidos grasos en la matriz sedimentaria total en la zona influenciada por la descarga de la cuenca estuarina, forman un grupo de estaciones estadísticamente diferente en el área del depocentro reportada por Carriquiry y Sánchez (1999). La contribución de ácidos grasos zooplanctónicos (34%) fue dominante, junto con las contribuciones de ácidos grasos fitoplanctónicos (25%). Los altos porcentajes de fuentes orgánicas marinas mezcladas con altos porcentajes de ácidos grasos terrígenos (25%), apoyan la idea de que en el depocentro puede ocurrir sedimentación de partículas marinas y terrígenas por efecto de las bajas velocidades de corrientes residuales.

El resto de las estaciones de la costa de Baja California presentaron altas concentraciones de ácidos grasos bacterianos (40%), indicando que los procesos de remineralización son dominantes en la zona influenciada por la descarga de la cuenca estuarina. Cabe señalar que estos ácidos grasos, determinados en la matriz orgánica

sedimentaria total, son predominantemente ramificados, indicativos de condiciones anaerobias.

Esto es consistente con los resultados de los ácidos grasos de fosfolípidos, que permitieron definir las mayores biomásas bacterianas asociadas a bajas razones de ácidos grasos monoinsaturados/ramificados y altas razones de iso y anteiso C15/C16 en la costa bajacaliforniana. Estos resultados indican que en este área existen condiciones predominantemente anaerobias, con menores contribuciones de eucariontes y altas biomásas bacterianas.

Esta zona comprende complejas interacciones diagenéticas, asociadas a sedimentos muy finos que provienen de la cuenca estuarina. Las mayores concentraciones de ácidos grasos de la matriz orgánica sedimentaria total y de los ácidos grasos de fosfolípidos, normalizados por unidad de carbono, de las estaciones directamente influenciadas por esta descarga, identifican un ambiente donde la producción heterótrofa asociada pudiera representar un flujo energético importante hacia otros niveles tróficos.

La distribución del sedimento proveniente de la cuenca estuarina está asociada a una composición orgánica significativamente diferente del resto del área de estudio. El complejo ciclo de resuspensión-depositación de los sedimentos deltáicos por efecto de las mareas, debe tener un resultado en el reciclamiento de las fuentes de carbono marino y terrígeno. Por esto se sugiere la influencia de la descarga de agua y sedimento por el canal y costa de Baja California como uno de los factores que define un ambiente caracterizado por microheterótrofos.

7. LITERATURA CITADA.

- Álvarez-Borrego, S. y L. A. Galindo-Bect. 1974. Hidrología del alto Golfo de California-I, Condiciones durante otoño. *Ciencias Marinas*, 1:46-64.
- Álvarez-Borrego, S. 1983. Gulf of California. En: Ketchum, B. H. (Ed.) *Ecosystems of the world 26: Estuaries and enclosed seas*. Cap. 17. pp. 427-449. Elsevier Sci. Pub. Co. New York.
- Azam, F., T. Fenchel, J. G. Fields, J. S. Gray, L. Meyer-Reil y F. Thingstad. 1983. The ecological role of water-column microbes in the sea. *Marine Ecology Progress Series*, 10:257-263.
- Baba, J., C. D. Peterson y H. J. Schrader. 1991a. Modern fine grained sediment in the Gulf of California during the last century, pp. 569-587. En: Dauphin, J. P. y B. R. T. Simoneit, (eds.), *The Gulf and Peninsular province of the Californias*. AAPG Memoir 47.
- Baba, J., C. D. Peterson y H. J. Schrader. 1991b. Fine-grained terrigenous sediment supply and dispersal in the Gulf of California during the last century, pp. 589-602. En: Dauphin, J.P. y B.R.T. Simoneit, (eds.), *The Gulf and Peninsular province of the Californias*. AAPG Memoir 47.
- Baird, B. H., D. E. Nivens, J. H. Parker y D. C. White. 1985. The biomass, community structure, and partial distribution of sedimentary microbiota from a high-energy area of the deep sea. *Deep Sea Research*, vol. 32(9):1089-1099.
- Balkwill, D. L., F. R., Leach, J. T., Wilson, J. F., McNabb, y D. C. White. 1988. Equivalence of microbial biomass measures based on membrane lipid and cell wall components, adenosine triphosphate, and direct counts in subsurface aquifer sediments. *Microbial Ecology*, 16:73-84.
- Benner R., B., Biddanda, B., Black y M., McCarthy 1997. Abundance, size distribution, and stable carbon and nitrogen isotopic compositions of marine organic matter isolated by tangential-flow ultrafiltration. *Marine Chemistry*, 57:243-263.
- Berner, R. A. 1989. Biogeochemical cycles of carbon and sulfur and their effect on atmospheric oxygen over Phanerozoic time. *Palaeogeography Paleoclimatology Palaeoecology (Global Planet Change Section)*, 75:97-122.
- Canuel, E. A. y C. S. Martens. 1993. Seasonal variations in the sources and alteration of organic matter associated with recently-deposited sediments. *Organic Geochemistry*, 20(5):563-577.

- Canuel, E. A. y C. S. Martens. 1996. Reactivity of recently deposited organic matter: Degradation of lipid compounds near the sediment-water interface. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(10):1793-1806.
- Caron, D. A., J. C. Goldman, O. K. Andersen y M. R. Dennett. 1985. Nutrient cycling in a marine microflagellate food chain: II. Population dynamics and carbon cycling. *Marine Ecology Progress Series*, 24:243-254.
- Castro, R., M. F. Lavin y P. Ripa. 1994. Seasonal heat balance in the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research*, 90:3249-3261.
- Carriquiry, J. D. 1993. Dinámica de sedimentación en el sistema del delta del río Colorado. II Congreso de la Sociedad Geológica Peninsular. Ensenada, Baja California. Abril, 1993.
- Carriquiry, J. D., A. Cupúl-Magaña y P. Castro P. 1992a. Anomalía en el balance sedimentario del río Colorado?. *Geos* 12(5):15-16
- Carriquiry, J. D., A. L. Cupúl-Magaña y E. Ortíz-Campos. 1992b. Flujos de sedimentos y nutrientes en la desembocadura del río Colorado durante mareas muertas. *Geos* 12 (5):16-18.
- Carriquiry, J. D. y A. Sánchez. 1999. Sedimentation in the Colorado River delta and Upper Gulf of California after nearly a century of discharge loss. *Marine Geology*, 00:1-21.
- Carriquiry, J. D. y C. Zamora-Casas. 1992. Patrones de sedimentación del seston en la desembocadura del río Colorado, México. IV Congreso de la Asociación de Investigadores del Mar de Cortés; 2,3,4 de septiembre de 1992. Universidad Autónoma de Baja California.
- Chávez-Vargas, J. A. 1997. Ácidos grasos como biomarcadores de las fuentes de carbono orgánico a los sedimentos superficiales de la parte norte del Golfo de California. Tesis de Maestría. FCM-IIO-UABC. 87 pp.
- Colombo, J. C., N. Silverberg y J. N. Gearing. 1996. Biogeochemistry of organic matter in the Laurentian Trough. II. Bulk composition of the sediments and relative reactivity of major components during early diagenesis. *Marine Chemistry*, 51:277-293.
- Colombo, J. C., N. Silverber y J. N. Gearing. 1997. Lipid biogeochemistry in the Laurentian Trough III. Changes in composition of fatty acids, sterol and aliphatic hydrocarbons during early diagenesis. *Organic Geochemistry*, 26 (2/4): 257-274.
- Colombo, J.C., N. Silverberg y J. N. Gearing. 1998. Amino acid biogeochemistry in the Laurentian Trough: vertical fluxes and individual reactivity during early diagenesis. *Organic Geochemistry*, 29 (4):936-945.

- Coleman, D. C. y B. Fry. 1993. Carbon isotope techniques. Chapter 11, pp. 173-183. Academic press, Inc. London.
- Cowie, G. L. y J. I. Hedges. 1992. Sources and reactivities of aminoacids in coastal marine environment. *Limnology and Oceanography*, 37:703-724.
- Cranwell, P. A. 1982. Lipids of aquatic sediments and sediments particulates. *Progress Lipid Research*, 21:271-308.
- Cupúl-Magaña, A. L. 1994. Flujos de sedimento en suspensión y de nutrientes en la cuenca del río Colorado. Tesis de Maestría. FCM-IIO-UABC. 116 pp.
- Cupúl-Magaña, A. L. y J. D. Carriquiry. 1992. Flujos de material en la desembocadura del río Colorado durante mareas muertas. IV Congreso de la Asociación de Investigadores del Mar de Cortés; 2,3,4 de septiembre de 1992. Universidad Autónoma de Baja California.
- Davis, J. C. 1986. *Statistics and Data Analysis in Geology*. second edition. John Wiley & Sons, New York, 646 pp.
- DeNiro, M. J. y S. Epstein. 1981. Influence of diet on the distribution of nitrogen isotopes in animal. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 45:341-351.
- Ducklow, H. W. 1991. The passage of carbon through microbial foodwebs: results from flow network models. *Marine Microbial Food Webs*, 5:129-144.
- Dowling, N. J. E., F. Widdel y D. C. White. 1986. Phospholipid ester-linked fatty acid biomarkers of acetate oxidizing sulfate reducers and other sulfide forming bacteria. *Journal General of Microbiology*, 132:1815-1825.
- Farfán, C. y S. Álvarez-Borrego. 1992. Biomasa del zooplancton del Alto Golfo de California. *Ciencias Marinas*, 18(3):17-36.
- Farrington, J. W. 1992. Marine organic geochemistry: review and challenges for the future. *Marine Chemistry*, 39:1-4.
- Fenchel, T. 1982. Ecology of heterotrophic microflagellates. II. Bioenergetics and growth. *Marine Ecology Progress Series*, 8:225-231.
- Findlay, R. H. y F. C. Dobbs. 1993. Quantitative description of microbial communities using lipid analysis. Sección II, Cap. 32. En Kemp, Sherr, Sherr y Cole (eds.). *Handbook of methods in aquatic microbiology*. 271-284 pp.

- Findlay, R. H., Trexler, M. B. y D. C. White. 1990. Response to benthic microbial community to biotic disturbance. *Marine Ecology Progress Series*, 62:135-138.
- Francois, R., M. A. Altabet y L. H. Burckle. 1992. Glacial to interglacial changes in surface nitrate utilization in the Indian sector of the Southern Ocean as recorded by sediment $\delta^{15}\text{N}$. *Paleoceanography*, 7: 589-606.
- Fry, B. y S. C. Wainwright. 1991. Diatom sources of ^{13}C -rich carbon in marine food webs. *Marine Ecology Progress Series*, vol. 76:149-157.
- Fry, B. y E. Sherr. 1988. $\delta^{13}\text{C}$ measurements as indicators of carbon flow in marine and freshwater ecosystems. En: Rundel, P. W., Ehleringer, J. R., Nagy, K. A. (eds.) *Stable isotopes in ecological research*. Springer Verlag, New York, pp. 196-229.
- Gearing, J. N. 1988. Stable isotopes as tracers of organic matter near and offshore. En: *Coastal-offshore Ecosystem Interactions. Lectures Notes on Coastal and Estuarine Studies*, vol. 22:69-107.
- Gillan, F. T. y R. W. Hogg. 1992. A method for the estimation of bacterial biomass and community structure in mangrove-associated sediments. *Journal of Microbiology Methods*, 2:275-280.
- González-Casillas M. T. 1991. Contaminación salina del río Colorado. *Travesía*, 24:12-21.
- Gray, J. S., J. G. Field, F. Azam, T. Fenchel, L. A. Meyer-Reil y F. Thingstad. 1984. The role of free bacteria and bacterivory. En: M. J. R. Fasham. (ed) *Flows of energy and materials in marine ecosystems. Theory and practice.. NATO Conference Series IV, Marine Sciences*. Plenum Press, New York. pp. 707-723.
- Guckert, J. B., M. A. Hood, y D.C. White. 1986. Phospholipid ester-linked fatty acid profile changes during nutrient deprivation of *Vibrio cholerae*: increase in the trans/cis ratio and proportions of cyclopropyl fatty acids. *Applied Environmental Microbiology*, 52:794-801.
- Hedges, J. I. 1992. Global biogeochemical cycles: progress and problems. *Marine Chemistry*, 39: 67-93.
- Hedges, J. I., W. A. Clark, P. Q. Quay, J. E. Richey, A. H. Devol, y U. de M. Santos. 1986. Compositions and fluxes of particulate organic material in the Amazon River. *Limnology and Oceanography*, 31:717-738.
- Hedges, J. I., R. G. Keil y R. Benner. 1997. What happens to terrestrial organic matter in the ocean? *Organic Geochemistry*, 27(5-6): 195-212.

- Hedges, J. I. y J. M. Oades (en prensa). Comparative organic geochemistries of soils and sediments. *Organic Geochemistry*.
- Hedges, J. I. y F. G. Prahl. 1993. En: F. Engel y S. A. Macko (eds.) Early diagenesis: consequences for applications of molecular biomarkers. *Organic Geochemistry*, Cap. 6. Plenum Press, New York. 237-250 pp.
- Hedges, J. I., H. J. Turin, y J. R. Ertel. 1984. Sources and distribution of sedimentary organic matter in the Columbia River drainage basin, Washington and Oregon. *Limnology and Oceanography*, 29:35-46.
- Henrichs, S. M. 1992. Early diagenesis of organic matter in marine sediments: progress and perplexity. *Marine Chemistry*, 39:119-149.
- Hernández-Ayón, J. M., M. S. Galindo-Bect, B. P. Flores-Baez, y S. Álvarez-Borrego. 1992. Nutrient concentrations are high in the turbid waters of the Colorado River Delta. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 37:593-602.
- Holmes, M. E., P. J. Muller, R. R. Schneider, M. Segl, J. Patzold y G. Wefer. 1996. Stable isotopes in Angola Basin surface sediments. *Marine Geology*, 134:1-12.
- Jorgensen, B. B., M. Bang y T. H. Blackburn. 1990. Anaerobic mineralization in marine sediments from the Baltic Sea-North Sea Transition. *Marine Ecology Progress Series*, 59:39-54.
- Kates, M. 1986. *Techniques of Lipidology*, 2nd De. Elsevier, New York.
- Kennicutt, M. C., C. Barker, J. M. DeFreitas y G. H. Zhu. 1987. Selected organic matter source indicators in the Orinoco, Nile and Changjiang deltas. *Organic Geochemistry*, 11: 41-51.
- Killops, S. D y V. J. Killops. 1993. *An Introduction to Organic Geochemistry*. De. Longman Scientific & Technical, New-York. 265 pp.
- Knowles, R. y T. H. Blackburn. 1993. Nitrogen isotope techniques. Capítulo 4. 89-122 pp. Academic Press, Inc. London.
- Lavin, M. F. y S. Organista. 1988. Surface heat flux in the northern Gulf of California. *Journal of Geophysical Research*, 93 (C11): 14, 033-038.
- LeBlanc, C. G., R.A. Bourbonniere, H. P. Schwarcz y M. J. Risk. 1989. Terrestrial input to estuarine bivalves as measured by multiple stable isotope tracers. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 28:261-276.

- Lee, C. y S. G. Wakeham. 1992. Organic matter in the water column: future research challenges. *Marine Chemistry*, 39:95-118.
- Lepley, L. K., S. P. Vonder, J. R. Hendrickson y R. G. Calderón 1975. Circulation in the northern Gulf of California from orbital photographs and ship investigations. *Ciencias Marinas*, 2(2):86-93.
- Martinez-Rojas-Reynoso, M.K. 1990. Distribución espacial y registros circadianos de temperatura, salinidad y oxígeno disuelto en el Delta del Río Colorado. Tesis de Licenciatura. FCM-UABC. Ensenada, B.C. México. 69 pp.
- Mancuso, C. A., P. D. Franzmann, H. R. Burton y P. D. Nichols. 1990. Microbial community structure and biomass estimates of methanogenic Antarctic Lake ecosystem as determined by phospholipid analyses. *Microbial Ecology*, 19:73-95.
- Matson, E. A. y M. M. Brinson. 1990. Stable carbon isotopes and the C/N ratio in the estuaries of the Pamlico and Neuse Rivers, North Carolina. *Limnology and Oceanography*. 35 (6):1290-1300.
- Matthews, J. B. 1969. Tides in the Gulf of California. En: D. A. Thomson (ed.), *Environmental impact of brine effluents on Gulf of California*, U.S. Dept. Int. Res. Dev. Prog. Rep., No. 387.
- Meckel, L. D. 1975. Holocene sand bodies in the Colorado Delta area, northern Gulf of California. In: *Deltas models for exploration*. Houston Geological Society, 239-266.
- Milliman, J. D. y R. H. Meade. 1983. World-wide delivery of river sediment to the oceans. *Journal of Geology*, 91(1):1-21.
- Miranda, F., Reyes, S., Espinoza, J. M. y J. García. 1990. Climatología de la región noroeste de México (Baja California, Baja California Sur, Sonora y Sinaloa). Parte II. Temperatura: series de tiempo del valor mensual y estadísticas del año climatológico. Publicación EBA No. 8. Reporte Técnico CIOFT9108, CICESE, Ensenada, B.C., México. pp 179.
- Moloney C. L. y J. G. Field. 1991. Modelling carbon and nitrogen flows in a microbial plankton community. En: P.C. Reid, C. M. Turley and P. H. Burkill (eds.) *Protozoa and their role in marine processes*. NATO-ASI Series. vol. G.25. Springer-Verlag. Berlin. 443-474 pp.
- Morales-Zamorano, L. A., R. Cajal-Medrano, E. Orellana-Cepeda y L. C. Jiménez-Pérez. 1991. Effect of tidal dynamics on a planktonic community in a coastal lagoon of Baja California, Mexico. *Marine Ecology Progress Series*, 78:229-239.

- Newell, R. C. y C. M. Turley. 1987. Carbon and nitrogen flow through pelagic microheterotrophic communities. En: A. I. L. Payne, J. A. Guillard and K. H. Brinks (eds.) *The Benguela and comparable ecosystems*, South African Journal of Marine Science, 5:717-734.
- Najdek, M. 1993. Factors influencing fatty acid and hydrocarbon composition of sedimenting particles in the northeastern Adriatic Sea. *Marine Chemistry*, 41:299-310.
- Orozco-Borbón M. V. 1995. Producción y biomasa del bacterioplancton en el delta del río Colorado y San Felipe, B.C., Golfo de California. Tesis de Maestría. FCM-IIO-UABC. 69 pp.
- Ostrom N. E., S. A. Macko, D. Deibel y R. J. Thompson. 1997. Seasonal variation in the stable carbon and nitrogen isotope biogeochemistry of a coastal cold ocean environment. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(14):929-2942.
- Owens, N. J. P. 1988. Natural variations in ^{15}N in the marine environment. *Advances in Marine Biology*, 24:389-451.
- Parkers, R. J. 1987. Ecology of microbial communities. En: Fletcher, M., Gray, T. R. G. and Jones, J. J. G. (eds.) *Society of General Microbiology Symposium on Ecology of Microbial Communities*. Cambridge University Press, Cambridge, 147-177 pp.
- Parkers R. J. y J. Taylor. 1983. The relationship between fatty acid distributions and bacterial respiratory types in contemporary marine sediments. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 16:173-189.
- Peters, K. E., R. E. Sweeney y I. R. Kaplan. 1978. Correlation of carbon and nitrogen stable isotope ratios in sedimentary organic matter. *Limnology and Oceanography*, 23:598-604.
- Peterson, B. J., R. W. Howarth, y R. H. Garrit. 1985. Multiple stable isotopes used to trace the flow of organic matter in estuarine food webs. *Science*, 227:1361-1363.
- Peterson, B. J. y B. Fry. 1987. Stable isotopes in ecosystem studies. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 18:293-320.
- Peterson, B., B. Fry, M. Hullar, S. Saupe y R. Wright. 1994. The distribution and stable carbon isotopic composition of dissolved organic carbon in estuaries. *Estuaries*, 17(1B):111-121.
- Pillon, P., L. Jocteur-Monrozier, C. Gonzalez y A. Saliot. 1986. Organic geochemistry of recent equatorial deltaic sediments. *Organic Geochemistry*, 10:711-716.

- Prahl, F. G. y L. A. Muehlhausen. 1989. Lipid biomarker as geochemical tools for paleo-oceanographic study. En: W. H. Berger, V. S. Smetacek y G. Wefer (eds.). Productivity of the Ocean: present and past. Wiley, Berlin, pp. 271-289.
- Rajendran, N., O. Matsuda, N. Imamura y Y. Urushigawa. 1992. Determination of microbial biomass and its community structure from the distribution of phospholipid ester-linked fatty acids in sediments of Hiroshima Bay and its adjacent bays. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 34:501-514.
- Reemstma, T., B. Haake, V. Ittekkot, R. R. Nair y U. H. Brockmann. 1990. Downward flux of particulate fatty acids in the Central Arabian Sea. *Marine Chemistry*, 29:183-202.
- Richard, P., P. Riera y R. Galois. 1997. Temporal variation in the chemical and carbon isotope composition of marine and terrestrial organic inputs in the Bay of Marennes-Oléron, France. *Journal of Coastal Research*, 13(3):879-889.
- Ringelberg, D. B., Davis, J. D., Smith, G. A., Pfiffner, S. M., Nichols, P. D., Nickels, J. S., Henson, J. M., Wilson, J. T., Yates, M., Kampbell, D. H., Read, H. W., Stocksdale, T. T. y White, D. C. 1988. validation of signature phospholipid fatty acid biomarkers for alkane-utilizing bacteria in soils and subsurface aquifer material. *FEMS Microbiology Ecology*, 62:39-50.
- Sánchez-González, A. 1995. Mineralogía de los sedimentos recientes en el delta del río Colorado. Tesis de licenciatura. FCM-UABC. pp. 72.
- Sánchez González, A. 1997. Procedencia y dispersión de los sedimentos en el norte del Golfo de California. Tesis de Maestría. FCM-UABC-IIO. pp. 62.
- Santamaría-del-Angel, E. M., S. Álvarez-Borrego y F. E. Muller-Karger. 1994. Gulf of California biogeographic regions based on coastal zone color scanner imagery. *Journal of Geophysical Research*, 99:7411-7421.
- Santamaría-del-Ángel E. M., R. Millán-Núñez y De la Peña-Nettel G. 1996. Efecto de la turbidez en la productividad primaria en dos estaciones en el área del delta del río Colorado. *Ciencias Marinas*, 22(4):483-493.
- Santos, V., D. S. M. Billett, A. L. Rice y G. A. Wolff. 1994. Organic matter in deep-sea sediments from Porcupine Abyssal Plain in the North-east Atlantic Ocean. I. Lipids. *Deep Sea Research I*, 41(5-6):787-819.
- Schultz, D. J. y J. A. Calder. 1976. Organic carbon $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ variations in estuarine sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 40:381-385.

- Skerrat, J. H., P. D. Nichols, T. A. McMeekin y H. Burton. 1995. Seasonal and interannual changes in planktonic biomass and community structure in eastern Antarctica using signature lipids. *Marine Chemistry*, 51:93-113.
- Smith, G. A., P. D. Nichols y D. C. White. 1986. Fatty acid composition and microbial activity of benthic marine sediment from McMurdo Sound, Antarctica. *FEMS Microbiology Ecology*, 38:219-231.
- Sun Ming-Yi, S. G. Wakeham y C. Lee. 1997. Rates and mechanisms of fatty acid degradation in oxic and anoxic coastal marine sediments of Long island Sound, New York, USA. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(2):341-355.
- Sweeney, R. E. y I. R. Kaplan. 1980. Natural abundances of ^{15}N as a source indicator for nearshore marine sedimentary and dissolved nitrogen. *Marine Chemistry*, 9:81-94.
- Thompson, R. W. 1979. Tidal-flat sediments of the Colorado River delta, northwestern Gulf of California, pp. 57-65. En: Ginsburg, R.N. (ed.) *Tidal Deposits*. Springer-Verlag, New York.
- Thornton, S. F. y J. McManus. 1994. Application of organic carbon and nitrogen stable isotope and C/N ratios as source indicators of organic matter provenance in estuarine systems: evidence from the Tay Estuary, Scotland. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 38:219-233.
- Turley, C. M. 1985. Biological studies in the vicinity of a shallow-sea tidal mixing front IV. Seasonal and spatial distribution of urea and its uptake by phytoplankton. *Philosophical Transactions of the Royal Society London*, B310: 471-500.
- Valdéz-Holguín, J. E., G. Gaxiola-Castro y R. Cervantes-Duarte. 1995. Productividad primaria en el Golfo de California, calculada a partir de la relación entre irradiancia superficial y clorofila de la zona eufótica. *Ciencias Marinas*, 21(2):311-329.
- Verardo, D. J., P. N. Froelich y A. McIntyre. 1990. Determination of organic and carbon nitrogen in marine sediments using the carlo Erba NA-1500 Analyser. *Deep Sea Research*, 37(1):157-165.
- Volkman, J. K., F. T. Gillan, R. B. Johns y G. Eglinton. 1981. Sources of neutral lipids in a temperate intertidal sediment. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 45:1817-1828.
- Volkman, J. K., R. B. Johns, F. T. Gillan, y H.J. Jr. Bavor. 1980. Microbial lipids of an intertidal sediment. I. Fatty acids and hydrocarbons. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 44:1133-1143.

- Volkman, J. K., S. W. Jeffrey, P. D. Nichols, G. I. Rogers y C. D. Garland. 1989. Fatty acid and lipid composition of ten species of microalgae used in mariculture. *Journal of Experimental Marine Biology Ecology*, 128:219-240.
- Wada, E. y A. Hattori. 1990. Nitrogen in the sea: forms, abundances and rate processes. CRC Press, Boca Raton.
- Wada, E., T. Kadonaga y S. Matsuo. 1975. ^{15}N abundance in nitrogen of naturally occurring substances and global assesment of denitrification from isotopic viewpoint. *Geochemistry Journal*, 9:139-148.
- Wada, E., M. Minagawa, H. Mizutani, T. Tsuji, R. Imaizumi y K. Karasawa. 1987. Biogeochemical studies on the transport of organic matter along the Otsuchi River Watershed, Japan. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 25:321-336.
- Wakeham, S. G. y J. A. Beier. 1991. Fatty acid and sterol biomarkers as indicators of particulate matter source and alteration processes in the Black Sea. *Deep Sea Research*, 38(2):S943-S968.
- Wakeham, S. G. y C. Lee. 1993. En: Engel y S. A. Macko (eds.) Production, transport, and alteration of particulate organic matter in the marine water column. *Organic Geochemistry*, Cap. 6. Plenum Press, New York. 145-165 pp.
- Wakeham, S. G., C. Lee; J. W. Farrington y R. B. Gagosian. 1984. Biochemistry of particulate matter in the oceans: results from sediment trap experiments. *Deep Sea Research*, 31(5):509-528.
- Wakeham, S. G., C. Lee, J. I. Hedges, P. J. Hernes y M. L. Peterson. 1997. Molecular indicators of diagenetic status in marine organic matter. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(24):5363-5369.
- Wakeman, S. G. y J. K. Volkman. 1991. Sampling and analysis of lipids in marine particulate matter. *Marine Particles: Analysis and Characterization*. En: *Geophysical Monograph* 63. American Geophysical Union (eds.) pp. 171-179.
- White, D. C. 1988. Validation of quantitative analisis for microbial biomass, community structure, and metabolic activity. *Advanced Limnology*, 31:1-18.
- White, D. C. 1993. In situ measurement of microbial biomass, community structure and nutritional status. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 344:59-67.
- White, D. C., W. M. Davis, J. S. Nickels, J. D. King y R. J. Bobbie. 1979. Determination of the sedimentary microbial biomass by extractible lipid phosphate. *Oecologia*, 40:51-55.

- Williams, P. J. Le B. 1981. Incorporation of microheterotrophic processes into the classical paradigm of the plankton food web. *Kieler Meeresforschungen Sonderheft*, 5:1-28.
- Wilson, J. O., I. Valiela y T. Swain. 1985. Sources and concentrations of vascular plant material in sediments of Buzzards Bay, Massachusetts, USA. *Marine Biology*, 90:129-137.
- Wolaver, T. G., S. Hutchinson y M. Marozas. 1986. Dissolved and particulate organic carbon in the North Inlet Estuary, South Carolina: what controls their concentrations? *Estuaries*, 9(1):31-38.
- Yamamuro, M. y H. Kayanne. 1995. Rapid direct determination of organic carbon and nitrogen in carbonate-bearing sediments with Yanaco MT-5 CHN analyzer. *Limnology and Oceanography*, 40(5):1001-1005 pp.
- Zamora-Casas, C. 1993. Comportamiento del seston en la desembocadura del río Colorado, Sonora-Baja California. Tesis de Licenciatura . FCM-UABC. pp. 73.
- Zieman, J. C., S. A. Macko y A. L. Mills. 1984. Role of seagrasses and mangroves in estuarine food webs: temporal and spatial changes in stable isotope composition and amino acid content during decomposition. *Bulletin of Marine Science*, 35(3):380-392.
- Zelles L. 1997. Phospholipid fatty acid profiles in selected members of soil microbial communities. *Chemosphere*, 35(1-2):275-294.