

Informe final* del Proyecto M011

Patrones de variación espacial y temporal de la biodiversidad fitoplanctónica de los cenotes abiertos de Yucatán

Responsable: Dr. Jorge Alfredo Herrera Silveira
Institución: Centro de Investigación y de Estudios Avanzados-Mérida
Departamento de Recursos del Mar
Dirección: Carretera Antigua a Progreso Km 6, Cordemex, Mérida, Yuc, 97310 , México
Correo electrónico: jherrera@mda.cinvestav.mx
Teléfono/Fax: Tel: (999) 1242162 Fax: (999) 9812334
Fecha de inicio: Agosto 29, 1997
Fecha de término: Junio 7, 1999
Principales resultados: Base de datos, Informe final

Forma de citar el informe final y otros resultados:** Herrera Silveira, J. A. 1999. Patrones de variación espacial y temporal de la biodiversidad fitoplanctónica de los cenotes abiertos de Yucatán. Instituto Politécnico Nacional. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados-Mérida. **Informe final SNIB-CONABIO proyecto No. M011.** México, D.F.

Resumen:

Proyecto financiado parcialmente con recursos de la Fundación MacArthur

Las características geológicas de la porción Norte de la Península de Yucatán son en gran parte responsables de la ausencia de corrientes superficiales de agua, y de la extensa red subterránea de corrientes de agua. A su vez, estos factores y la característica predominante carbonatada del suelo favorecen la formación de los cuerpos de agua dulce mas característicos de esta Zona Maya, los cenotes. Estos ecosistemas han tenido -y aún la conservan- importancia cultural, por los diversos usos que se hacen de ellos como la recreación, fuente de agua para uso doméstico, agropecuario y como depósito de desechos. A pesar de ello, la información sobre su localización y características ecológicas son escasas, lo que dificulta la toma de decisiones sobre las alternativas de uso de estos sistemas. Existen diversos tipos de cenotes, destacando aquellos que presentan una abertura superficial amplia -cenotes abiertos- lo que favorece el desarrollo de organismos en la columna del agua. Entre los componentes biológicos estructurales en la columna de agua, resalta la comunidad de fitoplancton por su rápida respuesta a variaciones de las características físico-químicas del medio, siendo este uno de los indicadores para evaluar la calidad ambiental. Por ello, la presente propuesta tiene como objetivos determinar la composición de especies dominantes del fitoplancton de cenotes abiertos, y su abundancia en relación a las características físicas y químicas a la columna del agua, así como evaluar el grado de impacto y las alternativas de manejo utilizando indicadores a la comunidad del fitoplancton y la técnica de análisis de amenazas. Para cumplir con estos objetivos, se realizarán tres muestreos extensivos -uno por cada época del año en al menos 30 cenotes previamente seleccionados que cubran un amplio gradiente de espacio (interiores-costeros, superficiales-profundos, de paredes verticales inclinadas), y usos (turismo local-foráneo, extracción de agua para ganadería-agricultura, vertido de desechos líquidos-sólidos). Se tomará muestra en diferentes niveles de profundidad de acuerdo a los gradientes de luz, temperatura y oxígeno. Se tomará en cada nivel muestras para el análisis de la comunidad del fitoplancton y variables físico-químicas. El análisis del fitoplancton se realizará utilizando microscopía de luz y contraste de fases, contando con la asesoría de expertos externos en taxonomía en los casos que ello lo amerite. Adicionalmente, en cada visita se analizará el grado de conservación, los usos y magnitud de los impactos en cada cenote, con la información recolectada y analizada se podrá contar con una base de datos de las especies dominantes del fitoplancton de cada cenote y sus variaciones espacio-temporales, la tipificación de los cenotes de acuerdo a sus característica hidrobiológicas, y un análisis de amenaza que permita jerarquizar los impactos en los cenotes, y priorizar las medidas del manejo.

-
- * El presente documento no necesariamente contiene los principales resultados del proyecto correspondiente o la descripción de los mismos. Los proyectos apoyados por la CONABIO así como información adicional sobre ellos, pueden consultarse en www.conabio.gob.mx
 - ** El usuario tiene la obligación, de conformidad con el artículo 57 de la LFDA, de citar a los autores de obras individuales, así como a los compiladores. De manera que deberán citarse todos los responsables de los proyectos, que proveyeron datos, así como a la CONABIO como depositaria, compiladora y proveedora de la información. En su caso, el usuario deberá obtener del proveedor la información complementaria sobre la autoría específica de los datos.

COMISION NACIONAL PARA EL USO Y CONOCIMIENTO DE LA BIODIVERSIDAD
(CONABIO)

PROYECTO M011

PATRONES DE VARIACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DE LA BIODIVERSIDAD
FITOPLANCTONICA DE LOS CENOTES ABIERTOS DE YUCATAN

Informe Final
Enero de 1999

Responsable del Proyecto Dr. Jorge A. Herrera Silveira

Participaron en el Contenido y Redacción de este Informe:

Dr. Francisco Comin

Dra. Mara Teresa Martín

Dr. Paul Hamilton

Biól. Verónica Díaz Arce

Biól. Javier Ramírez

Biól. Arturo Zaldívar

INTRODUCCIÓN

La Península de Yucatán (SE, México), es un macizo calcáreo afectado por un clima tropical. La naturaleza cárstica del terreno determina que no existan flujos de agua superficiales y que el agua de lluvia penetre rápidamente en el subsuelo. De modo que existe una gran variedad de cuerpos de agua dulce (cenotes, aguadas, cavernas y manantiales), los que han tenido históricamente -y actualmente la conservan-, gran importancia sociocultural y económica para los pobladores de la zona, además de que representan al ecosistema acuático más característico de Yucatán (Herrera-Silveira y Cornín, 1997). Una evaluación general menciona que existen más de 10,000 cenotes, de los cuales se desconoce incluso su ubicación geográfica exacta. Actualmente, estos cuerpos de agua son utilizados de diferentes formas, (por ejemplo, extracción de agua para uso doméstico, agrícola, ganadero, turístico y en algunos casos como lugares de depósito de desechos de diversa naturaleza). Sin embargo, las expectativas de uso de los cenotes y los planes de desarrollo rural asociados a estas expectativas no se basan en información ecológica, por lo que existe un alto riesgo de pérdida de especies de recursos en general, y de todo el ecosistema.

En un recorrido por la Península de Yucatán entre 1994 y 1997 realizado por el responsable de este proyecto y un equipo de investigación Español con gran experiencia en este tipo de estudios, se pudo comprobar el escaso conocimiento (aún al nivel de localización) de muchos de *estos cuerpos de agua*. La bibliografía existente se reduce a informes de expediciones norteamericanas realizadas entre 1930 y 1975 que aportan escasos datos de características físicas, químicas y poblamiento biológico de algunos cenotes en los alrededores de la capital (Mérida), de los cuales, algunos ya han desaparecido por el crecimiento de la mancha urbana. Recientemente, han sido descritas las características físicas, químicas y planctónicas de un cenote (López y Herrera-Silveira, 1994). También existe información de carácter general sobre el territorio y estudios previos sobre hidrología subterránea y aspectos muy particulares sobre un grupo de organismos (parásitos de peces, especies en una localidad), realizados por miembros de diferentes instituciones de educación superior e investigación.

En el breve recorrido que se hace mención, se localizaron más de 100 cenotes de todo tipo y de relativamente fácil acceso, distribuidos por toda la Península de Yucatán (desde Progreso a Chetumal, y desde Cancún a Campeche). Un alto porcentaje de ellos está siendo utilizado por las poblaciones humanas cercanas, y otros se localizan dentro de los límites de áreas protegidas de carácter estatal (Reserva de Dzilam de Bravo, Reserva El Palmar, Reserva de Cuxtal) o Federal (Reserva de Celestún, Reserva de Río Lagartos, Reserva de Calakmul, Reserva de Sian Ka'n),

lo que aumenta la importancia de evaluar sus características bióticas y abióticas.

El presente estudio se está desarrollando para contribuir tanto al conocimiento básico, evaluando la biodiversidad e importancia relativa de los grupos de fitoplancton de los cenotes, como aplicado, al complementar la información biológica con la evaluación de características ambientales de la columna de agua que mayor contribución tengan en la presencia, abundancia y distribución de las especies, ganando en información de carácter ecológico.

MATERIAL Y MÉTODOS

Se llevaron a cabo muestreos temporales (en la época de lluvias, nortes y seca) con tomas "in situ", de agua y de fitoplancton en 30 cenotes distribuidos por toda la Península de Yucatán (Fig.1). Se determinó su ubicación, se tomaron datos cuantitativos de los parámetros morfométricos (incluyendo los relativos a nivel, diámetro, superficie, profundidad) de caracterización física del agua (conductividad, pH, radiación lumínica, temperatura), usos y grado de perturbación.

Para el análisis de la riqueza de especies se colectaron muestras directas (1 L), con una botella tipo Van Dom y se fijaron usando una solución de lugol neutralizada con acetato de sodio y se almacenaron hasta su análisis en frascos de vidrio ambar.

La identificación y caracterización de la comunidad de fitoplancton se hizo por el conteo de células con la técnica de sedimentación utilizando un microscopio invertido. La identificación del material se realizó utilizando patrones morfométricos y estructurales, utilizando material bibliográfico especializado para cada grupo y de la región tropical. Se contó con la colaboración y asesoría de los Drs. Francisco Comín Sebastián y Dra. Ma. Teresa Martín Bustamante de la Universidad de Barcelona (España), y Dr. Paul Hamilton del Canadian Museum of Nature (Canada), para el trabajo taxonómico e interpretación de resultados. El primero y último asesor han participado en los muestreos y se han llevado alicuotas a sus respectivos laboratorios para ser *analizados con equipo especializado (microscopio de epifluorescencia y microscopio electrónico de barrido)*. Las muestras se han procesado y los resultados se presentan en la base de datos en el disco anexo.

La biomasa del fitoplancton se evaluó por medio de la abundancia de la Clorofila-a, usando la técnica de extracción con acetona y lectura en espectrofotómetro, y por la estimación del biovolumen de las células de las diferentes especies. Estos datos se están procesando.

Como información ecológica anexa y necesaria para el cumplimiento del segundo objetivo

específico, se hicieron estimaciones de profundidad, temperatura, coeficiente de extinción de la luz y visión del disco de Secchi, se procedió "in situ" a evaluar el pH, el oxígeno disuelto y la conductividad con un equipo YSI 85 multiparámetro. Al mismo tiempo, se tomaron muestras de la columna de agua con la misma periodicidad y en las mismas estaciones para la determinación de nutrientes inorgánicos siguiendo las técnicas estándar espectrofotométricas.

Para cumplir con el tercer objetivo específico, se procedió a realizar un levantamiento de los usos, impactos y causas de ellos, a través del procedimiento de análisis de amenazas propuesto por The Nature Conservancy, con el cual, además de la tipificación de los impactos se podrán cuantificar, utilizando una escala semilogarítmica, lo que permitirá realizar análisis estadísticos a la información adquirida. Este procedimiento ha sido utilizado para la elaboración de Planes de Manejo de Áreas Protegidas tanto en México como en otros países.

RESULTADOS

La información completa sobre las especies se encuentra en la base de datos del diskette anexo, el número de especies identificadas fue de 221 y el número de registros fue de 1038.

I DESCRIPCIÓN DE LOS CENOTES

(1) CENOTE LA UNION

El cenote se encuentra 4 km antes del poblado de la Unión, en el Estado de Quintana Roo; su posición geográfica es entre el paralelo 17°56'37" latitud norte y el meridiano 88°52'56" longitud oeste. No presenta ningún tipo de perturbación. Se encuentra a 200 m de la carretera. Tiene forma circular con un diámetro de 150 m. El espejo de agua se encuentra a 20 m de la superficie del terreno con una profundidad máxima de 33 m. El color del agua es azul turquesa. Se observan peces. Se encuentra rodeado por navajuela y vegetación de selva alta en buen estado de conservación, la vegetación acuática esta dada por algas filamentosas y Chara sp con gran cobertura. Se observan altas concentraciones de materia orgánica dentro del cenote. La zona es agrícola y la del cenote eventualmente es utilizado como balneario. Se encuentra rodeado por cerros de 60 a 70m de altura, provocando así un importante acarreo de materiales hacia el interior.

(2) CENOTE AZUL (BACALAR)

Se localiza en el km 5 de la carretera Bacalar-Chetumal en el Estado de Quintana Roo, su posición geográfica es entre el paralelo 18°38'53.2" latitud norte y el meridiano 88°29'48.3" longitud

oeste. Su forma es circular de 150 m de diámetro. Sus bordes con relativa pendiente que favorece el arrastre por escorrentía. El espejo de agua se encuentra unos 25 m de la superficie, la columna de agua tiene un tono azul intenso. Su profundidad máxima es de 75 m. Se encuentra rodeada por vegetación de selva mediana perennifolia perturbada. Se observan abundantes peces de gran tamaño. La cuenca del cenote está modificada en un 15 %, ya que se construyó un parador turístico (restaurante, escaleras y bordes de concreto para su fácil acceso). La actividad de la zona es turística y el cenote es utilizado como balneario, también hay extracción de agua para los servicios del lugar y al parecer el agua de desperdicio es regresada al cenote sin ningún tratamiento previo.

(3) CENOTE CAR-WASH

Se localiza en el km 8 de la carretera Tulum-Cobá en el Estado de Quintana Roo, a 25 m de la carretera; su posición geográfica es entre el paralelo 20°16'27" latitud norte y el meridiano 87°29'12" longitud oeste. Su forma es ovalada con 12 m de anchura y 30 m de largo. El espejo de agua se encuentra a 1.5 m de la superficie con poca pendiente, la transparencia del agua es total, con un tono azul cristalino. Su profundidad máxima es de 6 m, y con una caverna subterránea de varios cientos de metros de longitud. El fondo es arenoso con un 40 % cubierto por troncos, limpio de basura y de materia orgánica. Los bordes del cenote se modificaron, y se construyó una plataforma de madera, en un costado se encuentra un jardín con especies introducidas en su gran mayoría, pero en el lado opuesto se conserva vegetación del lugar como son carrizales y Arecaceas. El lugar cuenta con baños y vestidores. La actividad de la zona es turística y el cenote es frecuentemente utilizado como balneario y para actividades subacuáticas por poseer cavernas.

(4) CENOTE TANCAH

Se encuentra cerca de las ruinas de Tancah, Tulum en el Estado de Quintana Roo, su posición geográfica es entre el paralelo 20°15'59" latitud norte y el meridiano 87°23'28" longitud oeste, su forma es circular con un diámetro de 15 m. Su profundidad máxima es de 5 m, en el desemboca un manantial en forma de río proveniente del manglar. El espejo de agua se encuentra a nivel de superficie, la transparencia es total y el color del agua es amarilla como resultado de la

acumulación de taninos. La vegetación circundante es manglar con individuos de Rhizophora mangrove y Laguncularia racemosa. Se observan peces. La cuenca del cenote no está modificada, pero a su alrededor se desarrollan restaurantes y condominios con fines turísticos. La actividad de la zona es turística y el cenote es utilizado como balneario. Se encuentra a 100 m del mar.

(5) CENOTE XCACEL

Se encuentra en el centro turístico Xcacel, en el Estado de Quintana Roo; Su posición geográfica es entre el paralelo 20°20'05" latitud norte y el meridiano 87°20'59" longitud oeste. Su forma es circular con un diámetro de 7 m. El espejo de agua se encuentra a nivel de la superficie, la transparencia es total y la profundidad máxima es de 4.5 m. La vegetación circundante es por manglar con individuos de *Rhizophora mangle* y *Laguncularia racemosa*. Se observan peces. La cuenca esta modificada con andenes que recorren el borde del cenote, y con un muelle de madera. La actividad de la zona es turística y el cenote es utilizado como balneario. Se observan hojas sedimentadas provenientes del manglar. Se localiza a una distancia de 80 m del mar. En el mas reciente recorridot se observó que el terreno ha sido vendido a particulares y pretenden tapar este cenote o utilizarlo como fosa séptica perdiéndose la diversidad endémica de este sitio.

(6) CENOTE AZUL (PLAYA DEL CARMEN)

Se localiza en el km 18 de la carretera Playa del Carmen-Tulum en el Estado de Quintana Roo, a unos 80 m de la carretera; su posición geográfica es entre el paralelo 20°29'16" latitud norte y el meridiano 87°15'08" longitud oeste. Su forma es ovalada de unos 10 m de ancho y 20 m de largo con una constricción en el centro. Más de la mitad de sus bordes son de piedra, la cual forma un bóveda que cubre el 20% del cenote. El espejo de agua se encuentra a 4 m de la superficie, la transparencia de la columna de agua es total, con un tono azul. Su profundidad máxima es de 2.5 m. Se encuentra rodeado por selva mediana y árboles del género *Ficus* y Agavaceas, la vegetación acuática esta dada por algas filamentosas (clorofíceas) que cubren en su totalidad el fondo rocoso. Se observan peces. La cuenca del cenote está muy modificada ya que hay un muelle de madera, un puente para atravesar la constricción y escaleras para su acceso. La actividad de la zona y del cenote es turística, cuenta con cabañas y vestidos. Una característica de este cenote es que la parte que no cuenta con bordes de piedra podría favorecer el aporte de materia orgánica tanto por escorrentía como por acción antropogénica.

(7) CENOTE CRISTALINO

Se localiza en el km 16 de la carretera Playa del Carmen-Tulum en el Estado de Quintana Roo, a unos 60 m de la carretera; su posición geográfica es entre el paralelo 20°29'34" latitud norte y el meridiano 87°14'59" longitud oeste. Tiene forma de "L", en su parte mas ancha con 7 m y 30 m de largo. Sus bordes son de piedra, que forman una bóveda que cubre el 10% del cenote. El

espejo de agua se encuentra a 4m de la superficie, la transparencia de la columna de agua es total, con un tono azul. Su profundidad máxima es de 4 m. Se encuentra rodeado por palmeras, helechos y manglar con individuos de *Rhizophora mangle*, la vegetación acuática esta dada por algas filamentosas, que cubren el fondo rocoso. Se observan peces. La cuenca del cenote esta modificada para su acceso con caminos y puentes de concreto. La actividad de la zona es turística y el cenote frecuentemente es utilizado como balneario. Se observan hojas del manglar en el fondo por lo que este podría ser una fuente importante de carbono para el sistema.

(8) CENOTE CHAC MOL

Se localiza en el km 12 de la carretera Playa del Carmen-Tulum en el Estado de Quintana Roo, a 1 km de la carretera; su posición geográfica es entre el paralelo 20°30'42" latitud norte y el meridiano 87°14'49" longitud oeste. Su forma es de media luna que conserva una bóveda que cubre el 50% del cenote, su parte más ancha con 8 m y un largo de 50 m. El espejo de agua se encuentra a 10 m de la superficie, la transparencia de la columna de agua es total, con una profundidad máxima de 3.5 m. Se encuentra rodeado por selva mediana con especies de Agavaceas, Ficus y Sabal *yapa*; la cuenca del cenote ha sido modificada con andenes, escaleras, bordes; se han introducido plantas para una mejor vista escénica. No se observan peces. La actividad de la zona es turística y la del cenote son actividades subacuáticas. En el fondo se observa materia orgánica y una gruesa capa de sedimento de origen calizo.

(9) CENOTE CALICA 1

Se localiza en el km 7 de la carretera Playa del Carmen-Tulum en el estado de Quintana Roo, a 1 km de la carretera, se encuentra en propiedad de Calizas del Carmen (CALICA), su posición geográfica es entre el paralelo 20°34'12" latitud norte y el meridiano 87°04'44" longitud oeste. El cenote se divide en dos cuerpos de agua unidos por un canal, uno con 25 m de diámetro y el otro con 35 m. Tres cuartas partes del cenote esta bordeado de piedra de origen coralino a manera de acantilado. El espejo de agua se encuentra a 4 m de la superficie, la transparencia de la columna de agua es total, con un tono azul. Su profundidad máxima es de 2.5 m. La vegetación circundante es matorral de duna costera con individuos de *Laguncularia racemosa*, *Conocarpus erectus* Sabal *yapa*, *Suriana maritima*, la cual esta parcialmente modificada. La vegetación acuática esta dada por especies marinas como *Batophora oerstedii* y algas filamentosas. La fauna es muy variada ya que se pudieron observar peces, medusas y cangrejos. La cuenca del cenote ha sido

modificada con veredas y un puente para su acceso. La actividad de la zona es turística y la del cenote solamente escénico, cabe mencionar que en el lugar existe una estación marítima con una alta actividad. Por sus características hidrológicas y por sus especies es muy probable que tenga conexión con el mar, que se encuentra a menos de 100 m.

(10) CENOTE LEONA VICARIO

El cenote Leona Vicario está ubicado en el km 8 de la carretera Leona Vicario- Nuevo Xcan en el Estado de Quintana Roo; su posición geográfica es entre el paralelo 20°57'43" latitud norte y el meridiano y°16'25" longitud oeste. *Su forma es circular con un diámetro de 60 m.* El espejo de aguase encuentra a 2 m de la superficie, su profundidad es de 20 m, el color del agua es café amarillento. Está rodeado por vegetación de selva mediana y carrizales. Su cuenca está modificada, hay construcciones, restos orgánicos e inorgánicos. Se observan peces, así como pequeños parches de algas filamentosas. Este cuerpo de agua tiene uso extensivo como balneario y no debe de descartarse la posibilidad de extracción dei agua para riego, ya que se encuentra en una zona de ganadería y agricultura.

(11) CENOTE LA SIERRA

Se localiza en el poblado de La Sierra, Colonia Yucatán en el Estado de Yucatán; Su posición geográfica es entre el paralelo 21°11'48" latitud norte y el meridiano 87°43'08" longitud oeste. Su forma es circular con un diámetro de 15 m, y el espejo de agua se encuentra a 2.5 m de la superficie, el color del agua es verde intenso, con profundidad máxima de 20 m. La vegetación ha sido desplazada, en sus bordes solamente crecen individuos como son *Ficus*, *gramineas*, algunos árboles y pequeños arbustos. No se observan peces, solamente tortugas, presenta altas concentraciones de materiales orgánicos e inorgánicos (basura). La zona es ganadera, y el cenote sin ninguna actividad aparente, de acuerdo a los indicios del lugar, posiblemente se le extraía agua para el uso de los lugareños, pero al parecer el cenote se encuentra eutrofizado.

(12) CENOTE AZUL (COLONIA YUCATAN)

Se localiza en el poblado *llamado Cenote Azul a 4 km de Samaria* en la carretera colonia Yucatán-El Cuyo en el Estado de Yucatán; su posición geográfica es entre el paralelo 20°16'33" latitud norte y el meridiano 87°43'05" longitud oeste. Su forma es circular de unos 5 m de diámetro. El espejo de agua se encuentra a unos 3 m de la superficie, no tiene acceso. La transparencia de

la columna de agua es total, con un tono ligeramente verde. Su profundidad máxima es de 7 m. Se observa materia orgánica, polvo, plásticos y botellas en la superficie. La vegetación circundante esta dada por helechos que crecen en las paredes rocosas y por gramíneas. La cuenca ha sido modificada ya que cuenta con una barda que rodea al cenote. La actividad de la zona es agrícolaganadera; y la del cenote solamente es la extracción de agua para uso doméstico y agrícola.

(13) CENOTE KIKIL

Se localiza en el km 5 de la carretera Tizimín-Río Lagartos en el Estado de Yucatan; Su posición geográfica es entre el paralelo 21°11'36.6" latitud norte y el meridiano 88°10'10" longitud oeste. Su forma es circular con un diámetro de 30 m. Este cuerpo de agua se caracteriza por conservar un cuarto de su bóveda y en esta se han formado estalactitas, que filtran agua. El espejo de agua se encuentra a 6 m de la superficie, el color del agua es verde. La vegetación circundante es selva mediana y en las paredes crecen *Ficus*, leguminosas y helechos; las raíces de algunos árboles de la superficie llegan hasta el agua. Se observan peces. Tiene un gran aporte de materia orgánica (vegetal y animal). Se encuentra en una zona ganadera, pero el cenote es usado con fines turísticos. No se le da el cuidado necesario ya que hay restos orgánicos e inorgánicos (basura) en sus alrededores.

(14) CENOTE TREJO

Se encuentra el rancho "Dzonot" Trejo, en la carretera Dzilam Gonzalez-Yalsihom; su posición geográfica es entre el paralelo 21°18'43.2" latitud norte y el meridiano 88°40'03" longitud oeste. Tiene cerca de 20 m de diámetro y una profundidad máxima de 30 m, el color del agua es verde. Se observan peces. La vegetación que lo circunda ha sido en parte talada para la construcción de corrales, conservándose el 75%, representada por especies del género *Ficus*, y *Gramineas*, así como la especie acuática *Cyperus adora tus*. La zona es ganadera y la del cenote es la extracción de agua para el uso del rancho. Se observa materia orgánica en la superficie proveniente de la vegetación circundante, no ha sido modificado, pero recibe aportes orgánicos de los arrastres de los corrales de ganado. Se encuentra en buen estado.

(15) CENOTE "DZONOT" CERVERA

Se localiza en el rancho "Dzonot" Cervera, en el km 15 de la carretera Dzilam GonzalezYalsihom en el Estado de Yucatán, su posición geográfica es entre el paralelo 21°22'29" latitud

norte y el meridiano 88°50'02" longitud oeste. Su forma es circular con 20 m de diámetro, sus *bordes son de piedra en forma de acantilado*. El espejo de agua se encuentra a 2 m de la superficie, la transparencia de la columna de agua es total, con un tono verde-azul. Su profundidad máxima es de 6 m. En los bordes crecen leguminosas, helechos y gramíneas, la vegetación acuática esta dada por algas filamentosas (clorofíceas), aunque con baja cobertura. El fondo es rocoso y no se observa materia orgánica. Existen peces. La vegetación de la cuenca del cenote a sido cambiada a pastizales conocidos como "potreros". La actividad de la zona es ganadera y la del cenote es la extracción de agua para el uso del rancho.

(16) CENOTE BUCTZOTZ

Se localiza en el km 7 de la carretera Buctzotz-Tizimín en el Estado de Yucatan, a 20 m de la carretera; su posición geográfica es entre el paralelo 21°12'19.2" latitud norte y el meridiano 88°39'25.2" longitud oeste. Su forma es circular con 30 m de diámetro, sus bordes en pendiente favorecen el arrastre de materiales como suelo y materia orgánica. El espejo de agua se encuentra a 6 m de la superficie, se observa alta concentración de materia orgánica suspendida en la columna de agua, el color del agua es verde oscuro. Su profundidad máxima es de 30 m. Se encuentra rodeado por vegetación de selva mediana, con árboles de género Ficus, palmas y leguminosas, la vegetación acuática esta dada por *Nymphaeae* y en los bordes por navajuela. Se observan peces. En la cuenca del cenote se construyeron estanques para la cría de peces; pero el proyecto no funcionó, ya que este no soportó los volúmenes de extracción bajando su nivel rápidamente. La actividad de la zona es ganadera y el cenote sin ninguna actividad aparente.

(17) CENOTE TUZIC

Se encuentra en el poblado de Tuzic, municipio de Sucila en el Estado de Yucatán. Su posición geográfica es entre el paralelo 21°08'03.7" latitud norte y el meridiano 88°29'17.4" longitud oeste. Su forma es circular con 40 m de diámetro. El espejo de agua se encuentra a 6 m de la superficie, sus bordes son de piedra. La profundidad máxima es de 35 m. El color del agua es verde. Se observan peces. Se encuentra rodeado por selva mediana en buen estado (Leguminosas, Ficus y gramíneas), así como *Nymphaeae* y navajuela como vegetación acuática. Tiene gran aporte de materia orgánica debido al buen desarrollo de la vegetación que lo rodea. La actividad de la zona es ganadera y la del cenote es la extracción de agua, se encuentra en buen estado de conservación.

(18) CENOTE IX1L

Se localiza en el km 2 de la carretera Cenotillo-Sucila en el Estado de Yucatán; su posición geográfica es entre el paralelo 20°59'16" latitud norte y el meridiano 88°36'03" longitud oeste. Su forma es ovalada con 6 m de ancho y 10 m de largo. Este cenote tiene la particularidad de encontrarse en una cueva, pero la bóveda tiene una abertura de 10 m de diámetro, el espejo de agua se encuentra a 15 m de la superficie, con gran transparencia. El color del agua es azul intenso. Su profundidad máxima es de 40 m. Las paredes son de roca, presenta escasa vegetación, de la cual los helechos y especies rastreras son característicos. Recibe aporte de materia orgánica de la superficie ya que se observan hojas flotando en el agua. En algunas partes de la roca de la bóveda se filtra el agua. La gente del pueblo lo usa como balneario, también se le extrae agua para el uso del rancho. No está modificado pero hay restos orgánicos e inorgánicos (basura) en las orillas del cenote. Se observan peces y crustáceos. La actividad de la zona es ganadera.

(19) CENOTE ZACI

Se encuentra dentro de la ciudad de Valladolid, en el Estado de Yucatán, su posición geográfica es entre el paralelo 20°39'45" latitud norte y el meridiano 88°33' 02" longitud oeste. El diámetro de este sistema es de 40 m y el color del agua es ligeramente verde; conserva aún un tercio de su bóveda. El espejo de agua se encuentra a 20 m de la superficie y con una profundidad máxima de 35 m, se ha construido escaleras de piedra y miradores. A un costado del cenote crecen algunos helechos y plantas rastreras, por lo que tiene escaso aporte de materia orgánica. Se observan peces. En uno de sus bordes se ha construido un parador turístico (restaurante, servicios). La cuenca del cenote está totalmente modificada para el turismo. La actividad de la zona es agrícola y el cenote es frecuentemente visitado por el turismo y es utilizado como balneario.

(20) CENOTE IK-KIL

Cenote localizado sobre la carretera Pisté-Valladolid, a 200 m de Chichén Itzá, su posición geográfica es entre el paralelo 20°39'39.3" latitud norte y el meridiano 88°33'03.6" longitud oeste. Su forma es circular con un diámetro de 30 m, posee una bóveda con una ventana con 10 m de diámetro, sus paredes son de piedra. El espejo de agua se encuentra a 22 m de la superficie, la transparencia de la columna de agua es alta (>50%). El color del agua es azul intenso. Su profundidad máxima es de 75 m. Se observan peces. En las paredes se observan helechos, raíces de *Ficus* y *Commelinaceas*, la vegetación circundante ha sido destruida. La cuenca del cenote está

totalmente modificada, se ha construido un parador turístico sin ningún tipo de obra para mitigar los impactos (escaleras, miradores, cascadas artificiales, bordes de piedra, se le construyó una barda para evitar el arrastre de materiales hacia el interior), a su alrededor se está desarrollando un complejo turístico que cuenta con cabañas, hotel, palapas, piscinas, etc. La actividad de la zona *es turística y el cenote es visitado y utilizado como balneario. A este sistema se le extraen las hojas y ramas que caen en el interior.* Las paredes son ricas en carbonatos, por lo que posiblemente se esté filtrando hacia el interior

(21) CENOTE MAYALAND (X'TO LOK)

Se localiza en los terrenos del Hotel Mayal and en Chichen itza; su posición geográfica es entre el paralelo 20°48'3" latitud norte y el meridiano 88°34'05" longitud oeste. Su forma es circular con un diámetro de 25 m, sus bordes en pendiente propician el arrastre de materiales. El espejo de agua se encuentra a 12 m de la superficie, el color del agua es café. Su profundidad máxima es de 12 m. Está rodeado por selva mediana la cual está conservada. Se observan peces. La zona *es turística y el uso del cenote es escénico. En la superficie del agua se observa una capa de materia particulada, así como gran cantidad de hojas y ramas de la vegetación circundante.*

(22) CENOTE X'TOGIL

Se encuentra a 2 km al sur del poblado de Libre Unión, carretera a Yaxcabá. Su posición geográfica es entre el paralelo 20°41' 05.7" latitud norte y el meridiano 88°48' 16" longitud oeste. Su forma es circular con 30 m de diámetro, sus bordes son de piedra. El espejo de agua se encuentra a 10 m de la superficie, el color del agua es verde y con una profundidad máxima de 8 m. *La vegetación circundante es selva mediana y la vegetación acuática está dada por Nymphaea odorata y algas filamentosas.* Para el acceso al cenote se ha construido una escalera, así como *también un borde de cemento en una de las orillas, es importante señalar los grabados en piedra en la pared que forma parte de la bóveda, hechos presumiblemente por los antiguos Mayas, que indican que X'togil era un centro ceremonial.* La actividad de la zona es agrícola y la del cenote como balneario. Presenta abundante materia orgánica debido a las hojas de los árboles a su alrededor y por el excremento de murciélagos.

(23) CENOTE XCOLAC

Se encuentra sobre la carretera Izamal-Cenotillo, en el Estado de Yucatán. Su posición

geográfica es entre el paralelo 20°54'33" latitud norte y el meridiano 88°51'57" longitud oeste. Su forma es circular con un diámetro de 30 m, sus paredes son en pendiente, facilitando el arrastre de materiales hacia el interior. El espejo de agua se encuentra a 8 m de la superficie, el color del agua es verde. Su profundidad máxima es de 30 m. La vegetación correspondía a selva baja pero ha sido eliminada, la vegetación acuática con *Nymphaea odorata* y *Cyperus odoratus*. Se observan peces. Dentro del cenote hay materia orgánica (grandes troncos y ramas). La cuenca del cenote se modificó con fines turísticos, la vegetación ha sido eliminada, se han construido caminos, andenes, bancas, baños, chapoteaderos y cabañas. La actividad de la zona es agrícola-ganadera.

(24) CENOTÉ HOTZO

Se localiza sobre la carretera Izamal-Cenotillo en el Estado de Yucatán; su posición geográfica es entre el paralelo 20°54'15" latitud norte y el meridiano 88°51'44" longitud oeste. Su forma es circular con un diámetro de 50 m, sus bordes son de piedra. El espejo de agua se encuentra a 8 m de la superficie, el color del agua es verde. Su máxima profundidad son 20 m. Se observan escasos peces. Se encuentra rodeado por selva mediana que no está modificada, no se observa vegetación acuática. La cuenca del cenote solo está modificada con una escalera de concreto. La actividad de la zona es agrícola-ganadera, y la del cenote es la extracción de agua para el riego de plantaciones cítricas.

(25) CENOTES "CURVA" XCOLAC

Se localiza sobre la carretera Izamal-Cenotillo, su posición geográfica es entre el paralelo 20°54'32" latitud norte y el meridiano 88°52'34" longitud oeste. Su forma es circular con un diámetro de 20 m, sus bordes son en pendiente. El espejo de agua se encuentra a 4 m de la superficie. El color del agua es amarillo y la profundidad máxima es de 6 m. Se encuentra rodeado por pastizales, sembradíos de maíz y algunas especies de leguminosas. La cuenca del cenote ha sido modificada con fines agrícolas y ganaderos. La actividad de la zona es agrícola-ganadera y el cenote es utilizado como abrevadero para ganado. Este cenote al no tener bordes de piedra, facilita el arrastre de materiales hacia el interior.

(26) CENOTE IXINHA

Se localiza a 2.5 km del poblado de Txcacal Quintero, perteneciente al municipio de Huh1, su posición geográfica es entre el paralelo 20°37'54.1" latitud norte y el meridiano 89°06'34.5"

longitud oeste. Su forma es circular con un diámetro de 50 m. La mitad de sus bordes son de piedra, la cual forman una bóveda que cubre el 40 % del cenote. El espejo de agua se encuentra a 13 m de la superficie, el color del agua es verde. Su profundidad máxima es de 35 m. Se encuentra rodeado por vegetación de selva baja caducifolia, con individuos del género *Ficus*, *Malmea*, *Ta/isia*, *Acacia*, *Metopíum*, *Brosimun*. La vegetación acuática esta dada por algas filamentosas que cubren los bordes de piedra. Se observan peces. La cuenca del cenote no esta modificada, la vegetación se encuentra en buen estado de conservación. La actividad de la zona es ganadera y la del cenote como balneario a muy baja escala. El cenote tiene altas concentraciones de materia orgánica, gracias al buen desarrollo y estado de la vegetación.

(27) CENOTE CHEN-HA

Cenote localizado a 3 km al sur del poblado de Chocholá, en el Estado de Yucatán; su posición geográfica es entre el paralelo 20°41'22" latitud norte y el meridiano 89°52'34" longitud oeste. Su forma es circular de 70 m de diámetro. El espejo de agua se encuentra 5 m de la superficie y es de color verde. La profundidad máxima es de 25 m. La vegetación circundante es selva baja, en la orilla se observan carrizales, posiblemente del género *Thypha*, la vegetación acuática es por algas filamentosas y *Characeas*. Se observaron peces de gran tamaño. La cuenca del cenote ha sido modificada con palapas, baños, construcciones. La actividad de la zona es agrícola y el cenote ha sido convertido es un balneario y sitio de pesca.

(28) CENOTE DZITYA

Se localiza cerca del poblado de Dzitya en el Estado de Yucatán; su posición geográfica es entre el paralelo 21°03'54" latitud norte y el meridiano 89°41'31" longitud oeste. Su forma es ovalada con 10 m de largo por 6 m de ancho, sus bordes son de piedra, evitando hasta cierto punto el arrastre de materiales. El espejo de agua se encuentra a 2 m de la superficie, la transparencia de la columna de agua es total, con un tono verde. Su profundidad máxima es de 4 m. La vegetación que lo rodea es selva baja caducifolia. Se observan peces. La cuenca del cenote esta ligeramente modificada. A unos 40 m se encuentra una granja porcícola, que al parecer por el mal sistema de manejo de sus aguas negras, contaminan al cenote y en ciertas épocas del año se puede observar una gruesa capa de estos desperdicios sobre la superficie del agua. También se observa gran cantidad de basura dentro y fuera del cenote, que los lugareños dejan cuando visitan el sitio.

(29) CENOTE CHUNCHUCMIL

Se localiza a 5 km de la carretera Kinchil-Celestun rumbo a Chunchucmil, en el Estado de Yucatán; su posición geográfica es entre el paralelo 29°48'47" latitud norte y el meridiano 93°11'48" longitud oeste. Su forma es circular con diámetro de 25 m. El espejo de agua se encuentra a 1.5 m de la superficie y el color del agua es verde oscuro. Su profundidad máxima es de 15 m. Se encuentra rodeado por vegetación de selva baja caducifolia y en los bordes se encuentran helechos, carrizales e individuos del género *Ficus*, la vegetación acuática está dada por algas filamentosas y por *Nymphae odorata* y *Phragmites australis*. Se observan peces y ranas. La cuenca del cenote ha sido transformada en pastizales para alimento de ganado. La actividad de la zona es agrícola-ganadera aunque a baja escala. El cuerpo de agua conecta directamente con la vegetación circundante, dando como resultado las altas concentraciones de materia orgánica encontrada en el cenote.

(30) CENOTE EL REMATE

Cenote localizado entre el paralelo 20°32'00" latitud norte y el meridiano 90°22'13" longitud oeste en el Estado de Campeche. El espejo de agua se encuentra al mismo nivel que la superficie. Su forma es circular con 15 m de diámetro. La profundidad es de 2 m con transparencia total y de un color azul, con plantas acuáticas en la superficie cubriendo aproximadamente el 20% del cenote (*Nimphae*). Existen peces. Se observan hojas en el fondo provenientes de los árboles circundantes y en la orilla crecen algas verdes filamentosas. Se encuentra dentro de instalaciones para el turismo, por lo tanto está modificada su cuenca. Se observa deforestación de hierbas y arbustos, dejando solo árboles. Hay vestidores y baños, la orilla del cenote se modificó con la construcción de un puente y bardas. El tipo de vegetación es manglar y la actividad en la zona es extractiva (tala de madera). La característica de este cenote es la saliente de un arroyo que desemboca al mar con una longitud de aproximadamente de 7 -Km, ya que este sistema está constantemente aportando agua a manera de manantial.

II CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS

En la figura 1 se observa la distribución y localización de los cenotes estudiados en la Península de Yucatán.

(1) La Unión

Las mayores temperaturas se presentaron durante la época de secas, con una muy marcada termoclina hacia los 8 m. La luz tuvo un comportamiento y valores similares durante las épocas de lluvias y nortes estudiadas con mayores extinciones en el primer metro de profundidad.

En la época de secas la luz que penetra la columna de agua fué mayor, con un decremento a los 4 m de profundidad. El oxígeno fué mayor en secas hasta los 10 m en donde se observa una fuerte oxiclina sugiriendo importantes procesos metabólicos de consumo en esta zona. La conductividad fue mayor durante secas y en lluvias se observa estratificación en el primer metro de profundidad (Fig. 2).

(2) Azul (Bacalar)

Los perfiles de los parámetros estudiados, nos muestran que la temperatura fué mayor en la época de secas, se presenta una ligera termoclina a los 14 m durante la seca, en las otras dos épocas el comportamiento es homogéneo en toda la columna, siendo menor en nortes. La luz que penetra en el sistema fué mayor en lluvias. El comportamiento del oxígeno fué homogéneo, pero la mayor concentración se presentó en secas. La conductividad presentó el mismo patrón de comportamiento, pero los mayores valores se presentaron en la época de nortes (Fig. 3). La discontinuidad en la época de lluvias se debe a un evento de precipitación sucedido unos días antes del muestreo.

(3) Car Wash

En este cenote la temperatura tiene un comportamiento homogéneo durante la época de nortes y una estratificación durante las lluvias y secas entre los 1.5 y 3 m. La luz sigue el mismo patrón de no tener variaciones en la columna de agua durante nortes y secas y fuerte extinción durante lluvias. El oxígeno se comporta de manera irregular en temporadas de lluvias y nortes, en general, con tendencia a disminuir su concentración hacia el fondo de la columna de agua. La conductividad no presenta estratificación en lluvias y nortes, pero los valores son mayores en nortes, en secas se observa una estratificación después de los 2 metros (Fig. 4).

(4) Tancah

El comportamiento de la temperatura fué con pequeñas variaciones durante lluvias y nortes siendo mayor durante lluvias. En secas se observa una ligera termoclina a 1 m, el resto de la

columna presenta un comportamiento homogéneo. La luz registró sus valores mas altos durante nortes. La concentración de oxígeno fué mayor en secas, en lluvias y nortes las concentraciones son bajas, en las tres épocas no presentan variaciones verticales. La conductividad registró los mayores valores en secas, y con ligera tendencia a aumentar hacia el fondo (Fig. 5).

(5) Xcachel

La temperatura se presentó con una termoclina a un metro de profundidad las épocas de nortes y lluvias. Las mayores temperaturas se registraron en secas, con una termoclina a los 0.5 m. La penetración de la luz fué mayor durarme secas y no se observa que la extinción siga el patrón de decremento exponencial. El oxígeno presentó un comportamiento homogéneo durante lluvias y nortes, con bajas concentraciones en general. Las mayores concentraciones se presentaron en secas con tendencia a disminuir hacia el fondo de la columna de agua. La conductividad no presentó variaciones verticales, sin embargo, se observaron diferencias estacionales con los mayores valores en lluvias (Fig. 6).

(6) Azul (Playa del Carmen)

En este cenote se puede observar que en las tres épocas de muestreo se presenta urca termoclina al nivel de los 0.5 m de profundidad en lluvias y nortes, y a 1 m en secas presentando las mayores temperaturas en la época de lluvias. La cantidad de luz que penetra en la columna de agua es mayor durante la temporada de nortes, aunque en general, la extinción de la luz através de la columna de agua es mínima. El oxígeno disuelto presentó un comportamiento homogéneo a lo largo de la columna de agua durante las tres épocas, siendo mayor la concentración durante la seca. Sin embargo, la conductividad presenta una ligera estratificación de menor conductividad en la superficie y mayor en el fondo indicando la intrusión de agua marina durante lluvias y nortes, en secas el comportamiento es homogéneo. (Fig. 7).

(7) Cristalino

Las menores temperaturas se registraron en nortes con una ligera estratificación a nivel de 0.5 m, y con comportamiento homogéneo e! resto de la columna. Las épocas de lluvias y secas presentan un termoclina a los 0.5 m de ,profundidad, con valores más altos de temperatura en secas. La penetración de la luz en la columna de agua fué mayor en lluvias, no se observa una disminución exponencial de la luz a través de la columna de agua. El oxígeno no presentó

variaciones verticales aunque si estacionales. La conductividad presento sus mayores valores en lluvias, en nortes y secas presentan valores muy bajos. El comportamiento es homogéneo en toda la columna (Fig. 8).

(8) Chacmnol

La temperatura fué ligeramente mayor en secas, y en general no presentó variación dentro del sistema. La luz al igual que la temperatura fue mayor en lluvias. El oxígeno presentó un comportamiento heterogéneo en las épocas de lluvias y nortes con concentraciones similares, en secas se presentaron las mayores concentraciones de oxígeno con tendencia a disminuir hacia el fondo. La conductividad presento sus mayores valores durante nortes (Fig. 9).

(9) Calica

La temperatura dentro de este sistema tiene un comportamiento similar entre las épocas de lluvias y secas, las menores temperaturas se registraron en nortes. Sin embargo, hay que resaltar el aumento en la temperatura a medida que aumenta la profundidad, y que asociado a la representación de la conductividad, sugiere que hay una entrada de agua de mar que es de mayor temperatura. La intensidad luminosa que penetra a la columna de agua presenta un comportamiento relativamente homogéneo, y es mayor durante la época de secas. El oxígeno presenta un patrón de disminuir en los primeros niveles y aumentar a medida que la profundidad es mayor, relacionándose con la temperatura y conductividad principalmente durante la época de nortes. La conductividad presenta tendencia de menores valores hacia la superficie y mayores en el fondo del sistema, siendo mayor la estratificación en la temporada de nortes (Fig. 10).

(10) Leona Vicario

La temperatura fué mayor en la época de secas, con una termoclina a los 6 m. La luz dentro del sistema presentó el mismo comportamiento durante los muestreos, así como valores similares. El oxígeno fué mayor en lluvias y se observa estratificación a nivel de los 2 a los 9 m, sugiriendo que esta zona es de fuerte actividad metabólica. La conductividad presentó sus mayores concentraciones en secas y se observa una fuerte estratificación a nivel de 4 m de profundidad, reflejo de intrusión subterránea (Fig. 11).

(11) Sierra

La temperatura presentó un comportamiento homogéneo en la columna de agua en las épocas de lluvias y nortes, presentándose las temperaturas más altas en secas, variando 0.5 a 1 grado en las profundidades subsiguientes, cabe señalar que la diferencia de temperatura entre la época de nortes y la de secas fueron cinco grados. La concentración de oxígeno en la época de lluvias si hizo cero a los dos metros, en nortes se mantuvo homogéneo hasta los 10 m pero con valores menores que 2 mg L', en secas la concentración de oxígeno fué mayor, haciéndose cero a los 6 m. Esto sugiere que el sistema esta eutrofizado y existe una gran demanda de oxígeno. La conductividad presenta un comportamiento similar en lluvias y nortes en cuanto a la homogeneidad de los valores en la columna de agua, en la época de secas se presenta una estratificación en el perfil con tendencia a aumentar hacia en el fondo, lo que sugiere la existencia de intrusión de agua subterránea (Fig. 12).

(12) Azul (Colonia Yucatán)

Durante la época de lluvias la temperatura presenta una estratificación que se rompe a un metro de profundidad, a diferencia de nortes, donde es homogénea en toda la columna de agua, en secas las temperaturas son mayores. Al igual que la temperatura, las concentraciones mayores de oxígeno disuelto se presentan durante la época de lluvias presentando pequeños picos indicadores de consumo o producción de éste a lo largo de la columna de agua sin llegar al agotamiento. Para ambas épocas los valores de conductividad son los mismos en todas las profundidades de este sistema, pero se observa un incremento en nortes (Fig 13).

(13) Kikil

La temperatura durante nortes presenta una estratificación que aunque menor a un grado, se hace evidente al comparar el comportamiento de lluvias donde la línea es completamente vertical indicando homogeneidad en la columna de agua. En ambas épocas el oxígeno presenta un comportamiento semejante, cabe señalar un pico a los 11.5 m indicando un aumento en la producción, la cual se incrementa para época de nortes. Un comportamiento semejante en ambas épocas presenta la conductividad, con valores incrementados para la época de nortes (Fig.14).

(14) Trejo

El patrón de comportamiento de la temperatura es semejante en ambas épocas, siendo

mayores los valores para la época de lluvias. Para el caso del oxígeno en lluvias se presenta una oxiclina de los 12 a 13m, en las posteriores profundidades este parámetro se abate, en nortes el oxígeno no llega a abatirse. Para la conductividad el patrón es diferente ya que en nortes las profundidades son menores de 2 a 12m indicando intrusión de aguas subterráneas mientras que en nortes se incrementan los valores y se mantienen constantes en toda la columna de agua (Fig. 15).

(15) Cervera

A diferencia de otros cenotes, la temperatura en Cervera es homogénea en toda la columna de agua presentando valores más altos en lluvias, un patrón similar presenta el oxígeno, ya que si bien la concentración es mayor para lluvias, las diferencias son mínimas y no se abate. La conductividad en este cenote es mayor durante la época de nortes incrementándose hacia mayores profundidades ocurriendo lo contrario en lluvias indicando intrusión del agua subterránea (Fig. 16).

(16) Buctzotz

La temperatura es mayor durante la época de lluvias, pero en nortes se comienza a estratificar formando un metalimnio de 5 a 7m. El oxígeno forma una oxiclina a los 4.5 m, para luego abatirse a los 6m, durante la época de lluvias se observa consumo de oxígeno a los 3 y 9m manteniéndose constante en las otras profundidades. La conductividad es ligeramente menor en la superficie durante lluvias para luego mantenerse en la columna de agua. En nortes a partir de los 4m se incrementa la conductividad (Fig. 17).

(17) Tuzic

Las temperaturas más altas se cuantificaron en este sistema durante la época de lluvias presentándose el *metalimnio* de 0.5 a 14m, durante la época siguiente esta estratificación se rompe en los primeros metros hasta presentarse una disminución de ésta a los 15m. En el caso del oxígeno, este parámetro presenta un comportamiento discontinuo en los primeros 10 metros (en ambas épocas), hasta caer en las subsiguientes profundidades casi hasta abatirse, principalmente en la época de lluvias. La conductividad se encuentra estratificada en la época de lluvias, pero en nortes se rompe esta estratificación homogenizando la columna de agua (Fig. 18).

(18) Ixil

La temperatura presenta un comportamiento semejante durante ambas épocas, la diferencia de temperaturas es mínima. En el caso del oxígeno, el comportamiento es similar presentándose un aumento de la concentración de oxígeno durante la época de nortes. Es importante señalar que los valores de conductividad son mayores y homogéneos en toda la columna de agua durante lluvias, pero en nortes en el primer metro los valores bajan para posteriormente homogenizarse (Fig. 19).

(19) Zaci

Cenote con temperatura homogénea en toda la columna de agua en ambas temporadas, un caso semejante ocurre con el oxígeno, donde las concentraciones mayores se presentan durante nortes, así también los valores de conductividad son mas altos durante la misma época, presentando el mismo patrón de homogenidad para ambas temporadas (Fig. 20).

(20) Ikkii

La temperatura es estable en toda la columna de agua para la época de lluvias, posteriormente se estratifica durante nortes, las temperaturas más altas se presentan durante lluvias. El oxígeno tiene un comportamiento muy particular ya que a pesar que son durante nortes las concentraciones más altas a los 12 m se presentan los picos mayores para ambas temporadas señalando la producción de este elemento por microorganismos. La conductividad es homogénea durante la época de lluvias, pero en nortes las concentraciones más bajas se dan en los primeros 5m y de 15 a 25m, indicando un aporte de agua debido a las lluvias y al agua subterránea (Fig. 21).

(21) Xtolok (Mayaland)

Se observa una estratificación en la temperatura durante la época de Lluvias, el metalimnio se presenta de 4.5m a 6m, mientras que en nortes los vientos provocan la ruptura de ésta. El oxígeno es un parámetro que en nortes alcanza a estratificarse, presentándose la oxiclina de 0.5m a 2m. En ambas épocas se abate a partir de los 2m. La conductividad durante la época de lluvias es baja en los primeros 4m representando las precipitaciones características de esta época para luego aumentar en las posteriores profundidades, en la siguiente época este parámetro se homogeniza en toda la columna de agua (Fig. 22).

(22) Xtogil

La temperatura presenta un comportamiento homogéneo durante lluvias y en nortes disminuye casi exponencialmente a medida que se incrementa la profundidad. El oxígeno también decrece a medida que aumenta la profundidad, pero sin llegar a abatirse, este comportamiento es similar en ambas temporadas, presentándose las mayores concentraciones durante lluvias. El caso contrario ocurre con la conductividad, donde las mayores concentraciones se encuentran durante nortes indicando un menor aporte de agua ya sea subterránea o por escorrentía, pero siempre con valores homogéneos para toda la columna de agua (Fig. 23).

(23) Xcolac

El metalimnio se presenta durante la época de lluvias a los 9m estabilizándose en las profundidades posteriores, en nortes hay un decremento en la temperatura con una estabilización en toda la columna de agua. El oxígeno en este sistema baja su concentración a medida que aumenta la profundidad, pero en el caso de lluvias se presenta una oxiclina llegando a abatirse este parámetro a los 9m. Es importante señalar que aproximadamente a los 6m hay un incremento de la conductividad indicando intrusión marina, esto es corroborado por la disminución abrupta de la temperatura y el oxígeno para la misma época (lluvias). La conductividad se encuentra homogénea en toda la columna de agua para la época de nortes (Fig. 24).

(24) Hotzá

Durante la temporada de lluvias la temperatura decrece casi exponencialmente, ocurriendo lo contrario durante nortes donde la temperatura decrece hasta los 3m, pero se mantiene estable en las profundidades posteriores. La concentración de oxígeno decrece con la profundidad, pero presenta su máxima concentración a los 4m durante la época de lluvias, para la época de nortes se forma un oxiclina de un metro para luego abatirse el oxígeno a partir de los 2m. La conductividad durante lluvias se estratifica presentándose el quimiolimnio de los 4 a 10m donde se observa un aumento en los valores, para la siguiente época se comporta casi homogéneo en toda la columna de agua (Fig. 25).

(25) Curva Xcolac

El comportamiento de la temperatura en este sistema se comporta de manera semejante en ambas épocas, disminuyendo a medida que aumenta la profundidad, presentándose las

temperaturas más altas durante la época de lluvias. El oxígeno se presenta estratificado en la columna de agua en ambas épocas, homogenizándose a los 2.5m. Para la época de lluvias la conductividad se encuentra estratificada, presentándose la formación de un 'quimiolimnio a partir de los 2.5m, el cual se rompe para la época de nortes, donde los valores de este parámetros son similares en toda la columna de agua (Fig. 26).

(26) Ixinhá

La temperatura en este cenote para la época de lluvias se encuentra estratificada comenzándose a formar un metalimnio a los 25m, el cual se rompe al llegar la temporada de nortes. La concentración de oxígeno discontinua en la columna de agua presentándose, en el caso de la época de lluvias una mayor concentración en las primeras profundidades a diferencia de la época de nortes, donde las concentraciones se homogenizan en casi la totalidad de la columna de agua. El comportamiento de la conductividad en la columna de agua es indicativo de las lluvias presentes en ésta época, encontrándose los menores valores en las primeras profundidades, en contraste con la época de nortes, donde las concentraciones se homogenizan en la columna de agua (Fig. 27).

(27) Chenhá

En este cenote la mayor temperatura se presentó durante lluvias, observándose la termoclina durante esta época al nivel de los 8 m. La luz en ambas temporadas presentó valores y comportamientos similares con rápidas extinciones de la luz entre los 8 y 4 m. Los perfiles de oxígeno son diferentes en ambas épocas, durante la temporada de lluvias el oxígeno se abate a los 18m, mientras que durante nortes se mantienen concentraciones relativamente altas en toda la columna de agua. La conductividad no presentó estratificación y fue mayor en lluvias (Fig. 28).

(28) Dzityá

Durante la época de lluvias las temperaturas son mayores que en la época de nortes, aunque en ambas temporadas son homogéneas en toda la columna de agua. El oxígeno, en particular en la temporada de lluvias se estratifica, llegando a abatirse a los 4m a diferencia de nortes donde a pesar de que las concentraciones son menores no llega el sistema a anóxico. La conductividad presenta un comportamiento semejante durante ambas épocas, presentándose los valores más altos durante nortes. (Fig. 29).

(29) Chunchucmil

Las temperaturas más altas se reportan para la época de lluvias, pero en ambas temporadas el comportamiento es homogéneo. El oxígeno es un parámetro que se estratifica formando una oxiclina durante la época de lluvias decreciendo de manera exponencial a partir de los 2m, el nortes es muy homogéneo en la columna de agua hasta llegar a los 10.5m donde se abate. En el caso de la conductividad las concentraciones mayores se reportan para la época de nortes, pero en ambas temporadas están homogéneos los valores en la columna de agua (Fig. 30).

(30) El Remate

La mayor temperatura se encontró durante la época de lluvias. La luz registro sus mayores valores durante la temporada de nortes. El oxígeno presentó bajas concentraciones en general, las mayores concentraciones se encontraron en nortes. La conductividad presentó un comportamiento homogéneo en el sistema, las mayores conductividades se presentaron en lluvias (Fig. 31).

III DESCRIPCIÓN GENERAL DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS.

En la tabla 1 se presenta la media anual de las características ambientales medidas en cada cenote estudiado.

La variación de la profundidad de los cenotes fue en el intervalo de 2 a 75 m. La penetración de la luz en la columna de agua por medio del coeficiente de extinción de la luz fue mayor en el cenote Cristalino con un valor de $k=0.02\text{m}^{-1}$ y el que menor penetración presentó fue el cenote Xtolok (Maya; and) con $k= 1.53\text{ m}^{-1}$, la media del coeficiente de extinción de la luz fue de $k=0.48\text{ m}^{-1}$. La media de concentración de oxígeno disuelto para todos los cenotes fue de 3.97 mg/L, presentándose la más alta concentración en el cenote Chacmol y la menor en el cenote Remate. El comportamiento de la conductividad fue con una media de 1526 $\mu\text{S}/\text{cm}$, y en un intervalo de 3686 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el cenote Cervera y 524 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el Cristalino. La temperatura presentó una media anual de 27.2°C y un rango de variación de 28.2 a 25.2°C. El pH se mantuvo en un rango de 8.9 en el cenote Curva xcolac y 6.7 en el cenote Chunchucmil, la media para todos los cenotes fue de 7.74. La alcalinidad entre los cenotes fue muy variable encontrándose valores entre 6.29 meq I^{-} y 2.98 meq I^{-} , con una media de 4.33 meq I^{-} . La concentración de nitratos fue mayor en el cenote de Dzityá con un valor de 63.96 μM y el que menor concentración presentó fue el cenote la Unión con un valor de 0.13 μM , la media anual fue de 37.51 μM . La concentración media anual de nitritos fue de 0.13 μM , encontrándose la mayor concentración en el cenote Trejo con un valor de 0.70 μM , y

contaminación orgánica y la modificación del hábitat, ya que se le ha eliminado totalmente la vegetación circundante y todos los desperdicios de las casas que se encuentran a su alrededor se acumulan en las aguas del mismo. El cenote Dzityá está muy impactado, pues indirectamente sirve como sumidero de una granja porcina que se encuentra adyacente al cenote, observándose una gruesa capa de desperdicios en la superficie durante la época

de lluvias. El cenote Xcacel es utilizado como balneario por una gran cantidad de turistas que lo visitan a diario, está modificado para su fácil acceso y está a punto de desaparecer por la construcción de un desarrollo turístico. Y en el caso de los cenotes de Chen-há y Kikil, todos los impactos seleccionados tienen un considerable efecto sobre ellos.

El espolobuceo es una actividad con importante potencial de uso en estos cuerpos de agua, sin embargo, el desarrollar esta actividad por buzos inexpertos está provocando importantes cambios hidrológicos de los cenotes con el potencial riesgo de pérdida de especies y potencial de uso. Se recomienda que esta actividad sea supervisada por expertos en hidrología para mitigar los impactos.

Se recomienda iniciar programas de monitoreo de los cenotes con mayor uso para estar preparadas en caso de contingencias hidrológicas.

Por todo esto, es necesario que se sigan apoyando los estudios sobre la biodiversidad y ecología de los cenotes, y que en base a la información generada poder implementar estrategias de manejo para la conservación de la calidad del agua y diversidad de especies que habitan estos sistemas, y así promover el uso racional que permita un mayor aprovechamiento de tipo sustentable de los recursos naturales que proporcionan estos ecosistemas únicos en su tipo en México.

Tabla 1. Media anual de las características ambientales de 30 cenotes abiertos de Yucatán, Campeche y Quintana Roo. Prof (Profundidad); k (Coeficiente de extinción de la luz); OD(Oxígeno disuelto); CD(Conductividad), T(Temperatura); NO₃ (Nitratos); NO₂ (Nitrios); NH₄ (Amonio); SRP (Fósforo reactivo soluble), SRS (Sílice reactivo soluble); Cloro "a" (Clorofila) "a".

CENOTE	Prof m	k -m	OD mg/l	CD µs/cm	T °C	pH	Alcalinidad meq/l	NO ₃ µM	NO ₂ µM	NH ₄ µM	S.R.P. µM	S.R.S. µM	Cloro "a" mg/m ³
Ixinhá	34	0.53	3.27	973	26.2	7.15	6.29	61.55	0.07	0.86	0.1	84.79	1.78
Azul (Playa del carmen)	2.5	0.29	2.88	882	25.3	8.12	4.77	52.21	0.15	1.39	1.09	47.24	0.69
Azul (Colonia Yucatán)	7	0.11	1.93	1161	25.3	7.01	5.42	63.36	0.05	2.02	0.02	60.06	12.59
Azul (Bacalar)	75	0.25	5.5	2467	29.9	7.85	5.22	3.29	0.03	3.13	1.00	103.75	1.00
Buctzotz	30	1.20	4.21	1055	28.2	7.15	3.63	9.82	0.04	4.91	0.02	85.74	6.89
Calica	2.5	0.03	5.27	2528	28	8.38	2.98	11.35	0.08	2.90	0.17	10.34	1.30
Car-wash	6	0.09	2.34	1421	26.4	7.32	5.89	50.22	0.04	5.40	0.33	38.35	2.22
Cervera	6	0.10	1.89	3686	26.9	7.44	4.38	52.88	0.09	3.96	0.11	96.02	8.77
Cristalino	4	0.02	3.34	524	25.2	7.99	5.32	47.23	0.15	2.78	1.16	39.79	0.39
Curva Xcolac	6	0.17	6.06	1890	28.5	8.9	5.92	2.60	0.20	58.72	0.22	105.95	34.49
Chacmol	3.5	0.05	3.76	2351	25.6	7.9	6.25	50.02	0.06	3.38	0.03	29.29	2.76
Chen-há	25	0.47	7.05	2747	29.71	7.38	3.24	53.31	0.07	4.61	0.03	188.81	2.90
Chunchucmil	15	0.23	7.67	2094	28.1	6.7	3.60	17.38	0.06	5.58	0.42	84.68	5.85
Dzilyá	4	0.23	4.79	1599	27.71	7.58	4.18	63.96	0.48	7.27	0.18	96.72	19.73
Hotzó	20	0.03	3.79	1140	27.5	8.57	3.41	7.68	0.13	26.88	0.17	125.87	18.71
Ik kil	75	0.09	4.86	916	29.8	8.19	3.59	51.13	0.24	2.97	0.61	154.96	0.71
Ixil	40	0.10	2.24	1692	26	7.39	4.23	52.81	0.02	1.17	0.40	122.64	0.84
Kikil	55	0.30	2.93	1962	26.3	7.74	4.64	63.41	0.08	3.78	1.19	56.94	3.44
Leona Vicario	20	1.02	5.48	593	28.5	8.53	3.37	2.49	0.02	3.40	0.02	23.94	3.65
X'tolok (Mayaland)	12	1.53	2.89	716	25.6	8.18	3.08	37.63	0.19	9.28	0.17	200.44	20.19
Remate	2	0.12	1.51	3127	27	7.13	2.98	64.91	0.10	3.71	0.05	144.48	1.32
Sierra	20	1.36	2.81	696	25.7	7.57	3.72	34.14	0.08	17.79	1.68	29.49	20.20
Tancah	5	0.12	2.81	1322	26.9	7.29	5.45	14.81	0.13	1.90	0.57	51.34	0.64
Trejo	30	0.98	4.97	1670	28.7	7.34	3.92	43.94	0.70	4.23	0.26	41.81	10.36
Tuzic	35	1.00	4.69	1480	28.3	7.91	4.80	36.67	0.11	2.46	0.56	83.95	2.97
Unión	33	0.94	5.18	1098	29.5	8.13	3.12	2.26	0.05	5.50	0.84	147.61	1.65
Xcaceel	4.5	0.27	2.99	584	25.9	7.5	4.75	39.62	0.10	3.34	0.24	59.91	0.51
Xcolac	30	0.97	4.49	1261	28.9	8.07	4.09	45.12	0.10	44.74	1.99	82.42	5.36
Xtogil	8	0.80	4.31	885	26.91	7.7	3.82	38.05	0.13	9.49	0.25	70.63	9.84
Zaci	35	0.86	3.11	1265	26	7.96	5.83	75.51	0.02	3.74	0.08	93.00	8.00
Media	21.5	0.48	3.97	1526	27.2	7.74	4.33	37.51	0.13	8.63	0.47	85.38	7.17

Tabla 2. Matriz de amenazas de los cenotes estudiados.

CENOTE	Contaminación Orgánica	Contaminación	Modificación de Habitat	Urbanización	Uso directo del agua	Total
Ixinhá	60	10	15	0	10	95
Azul (Playa del)	10	10	60	20	100	200
Azul (Colonia)	20	50	100	80	0	250
Azul	40	20	40	40	90	230
Buctzolz	100	20	30	0	0	150
Calles	0	0	60	25	0	85
Car-wash	20	10	80	1	100	250
Cervera	40	10	90	0	10	150
Cristalino	40	10	90	20	100	260
Curva XColac	90	10	95	10	0	205
Chacmol	30	10	60	20	90	210
Chenhá	16					80
Chun-	60	20	70	20	10	180
Dzityá	100	8				1
Hotzó	100	13	20	60	25	215
Ik kif	10	10	100	50	90	260
Ixll	0	15	40	10	20	85
Kikii			0			280
Leona Vicario	60	30	60	0	15	165
X'lolok	100	40	20	0	0	160
Remate	30	10	100	40	65	245
Sierra.	100	60	00	100		36e
Tancab	0	10	30	40	100	180
Traio	40	20	85	50	0	195
Tunic	30	10	10	10	10	70
Unión	10	10	0	0	5	25
xcacel			100.		00	310
Xcolac	30	15	100	40	40	225
Xtogil	50	15	90	0	25	180
ZaCi	10	10	100	100	40	260
Total	1305	620	1955	1035	1140	

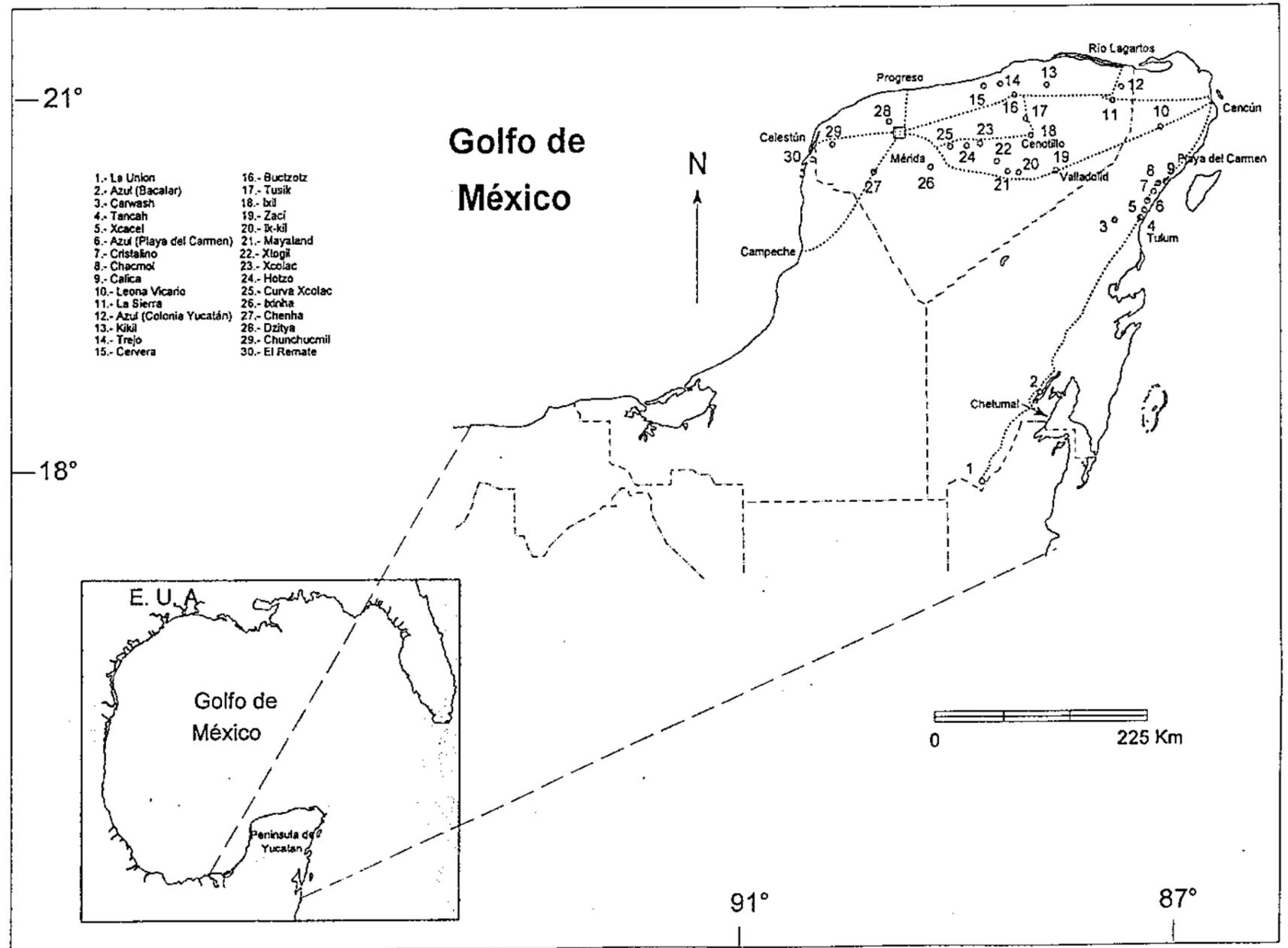


Figura 1. Localización de los cenotes estudiados durante las temporadas de lluvias, nortes y secas, en la Península de Yucatán.

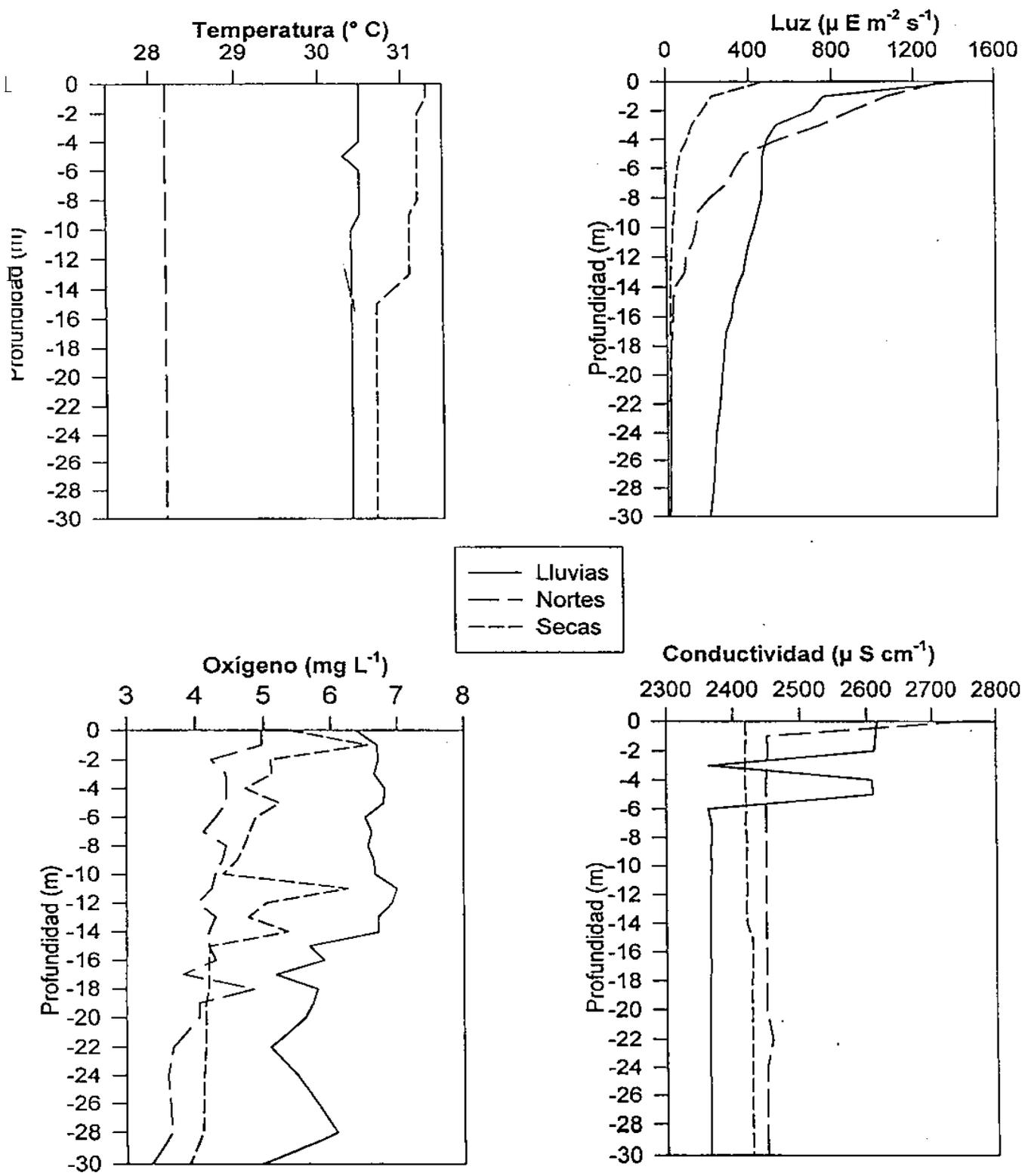


Figura 3. Azul (Bacalar).

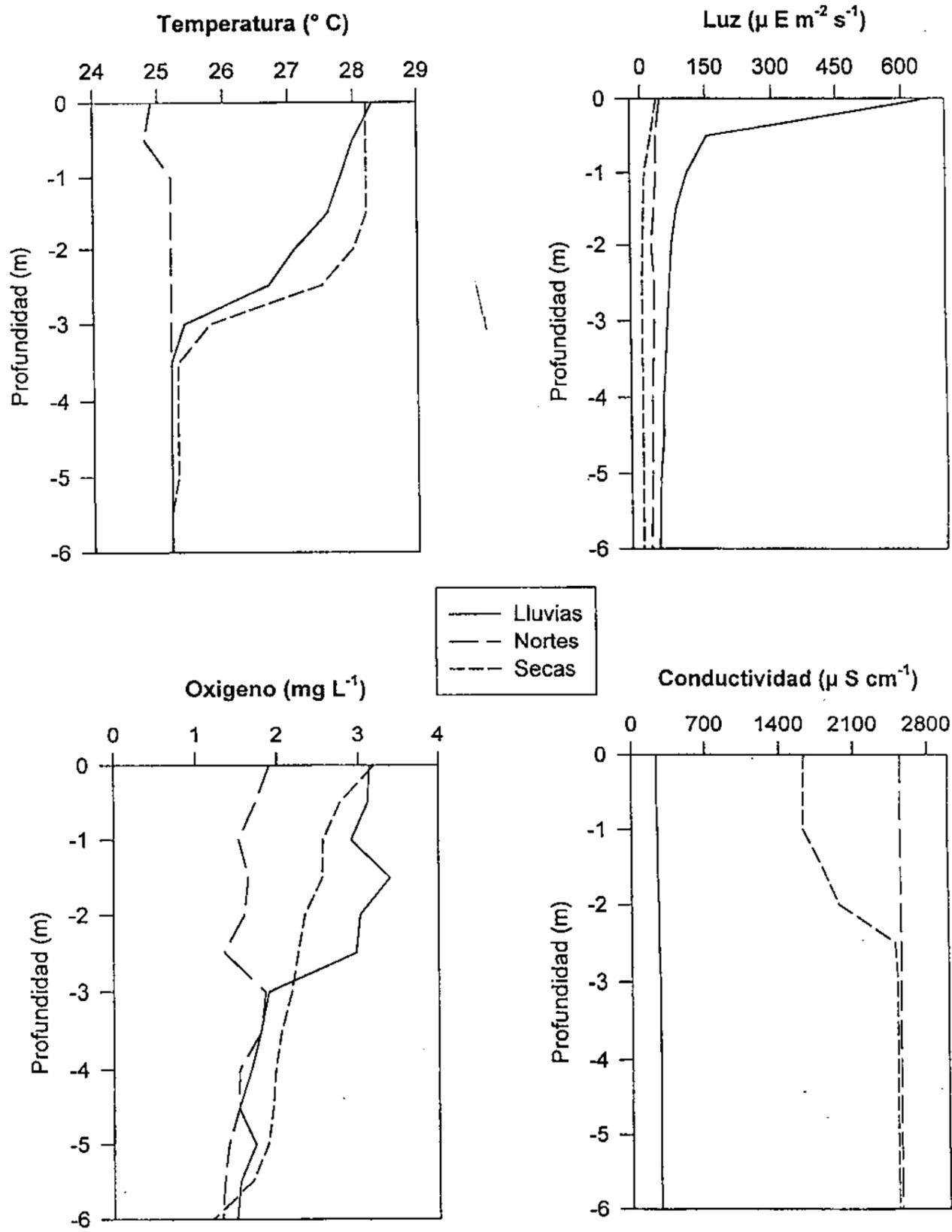


Figura 4. Car Wash.

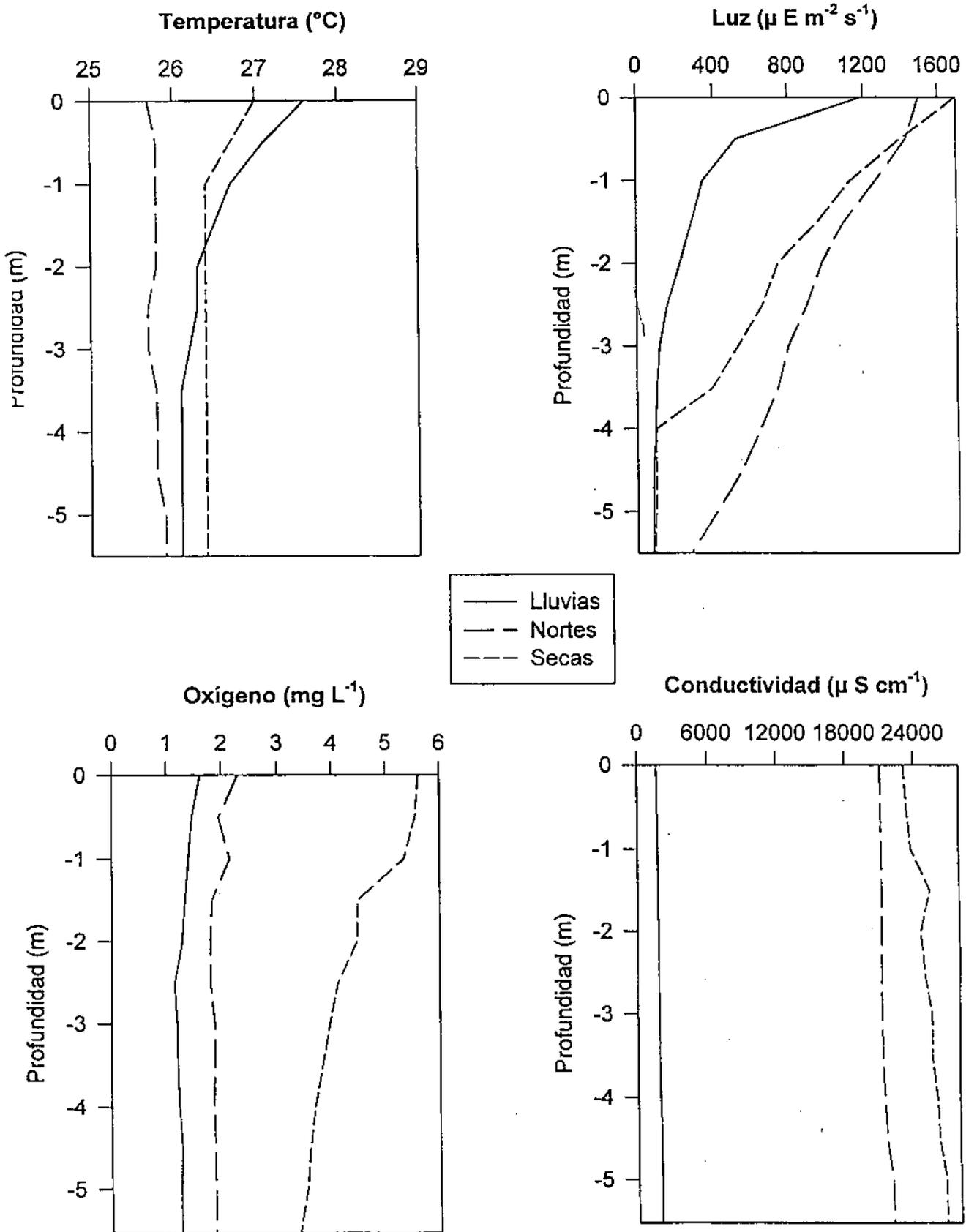


Figura 5. Tanchah.

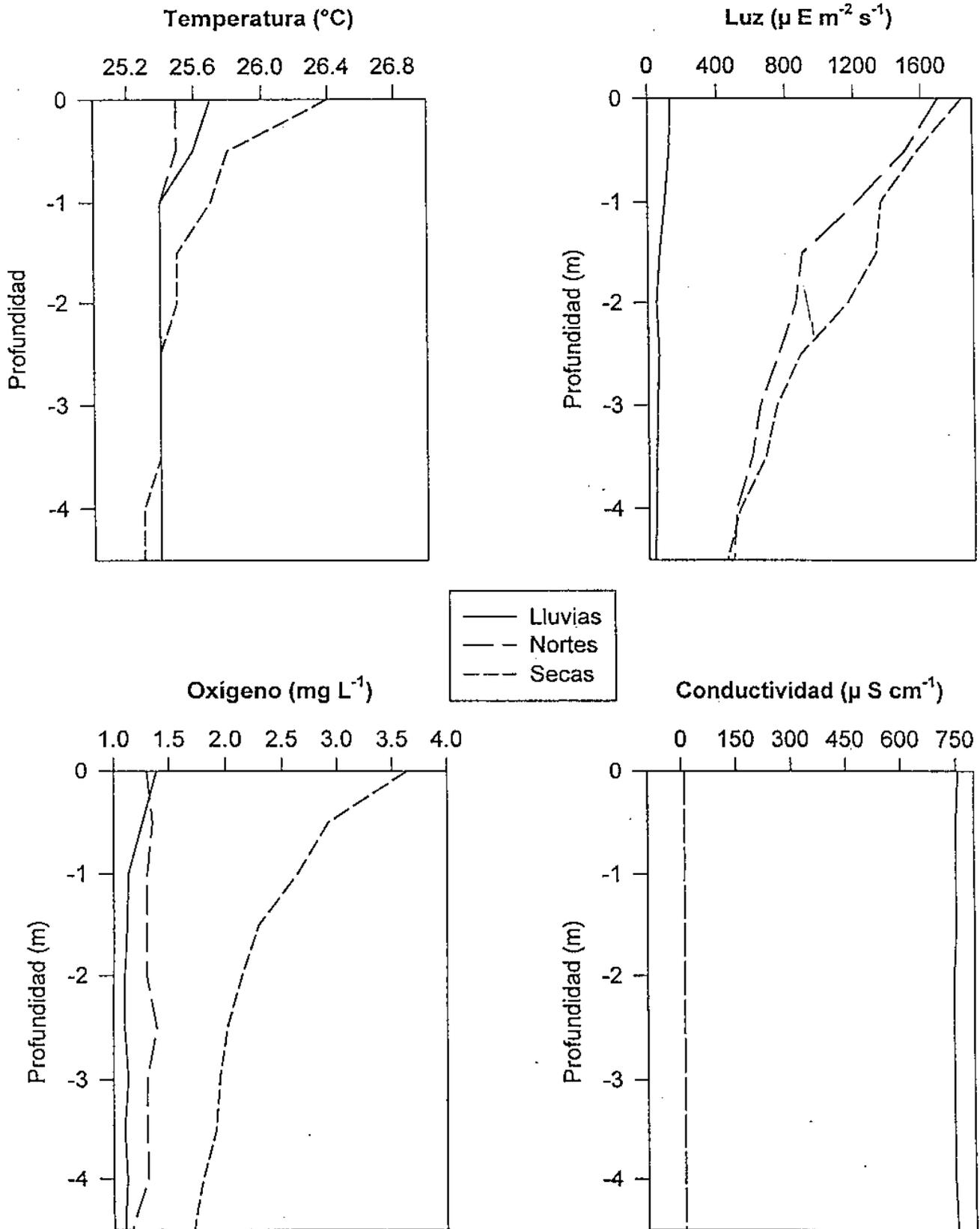
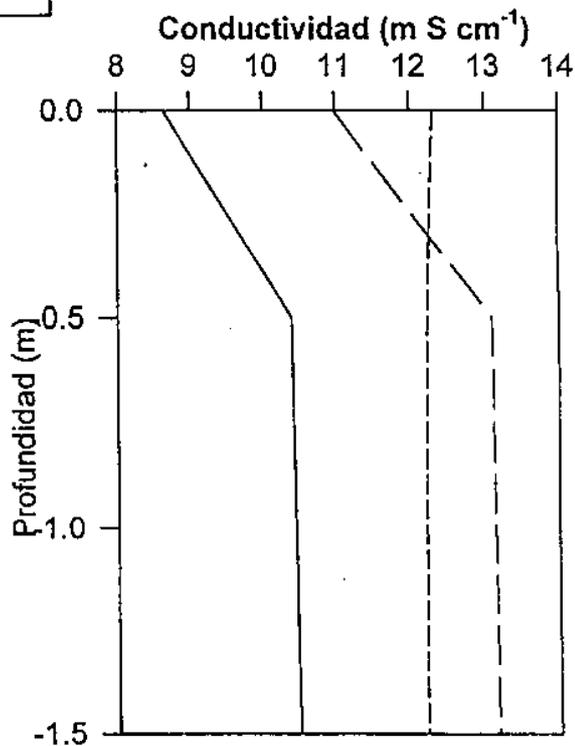
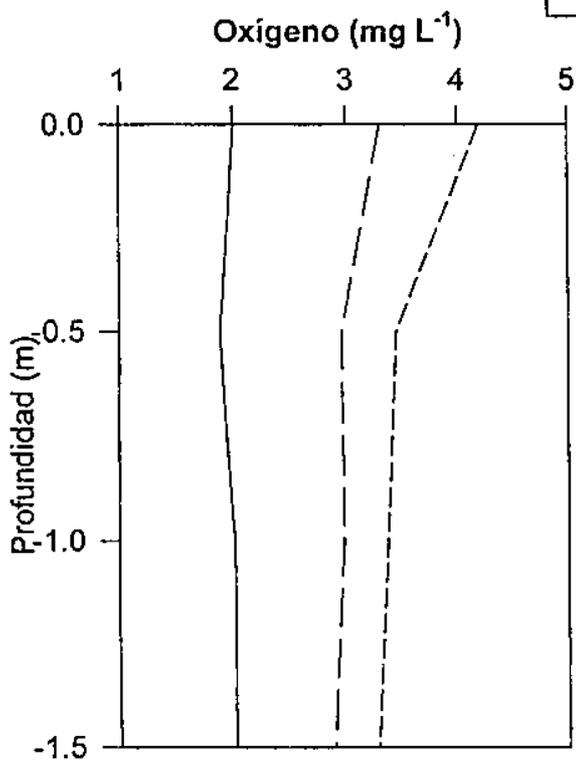
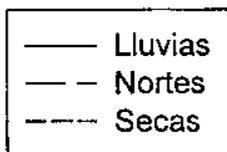
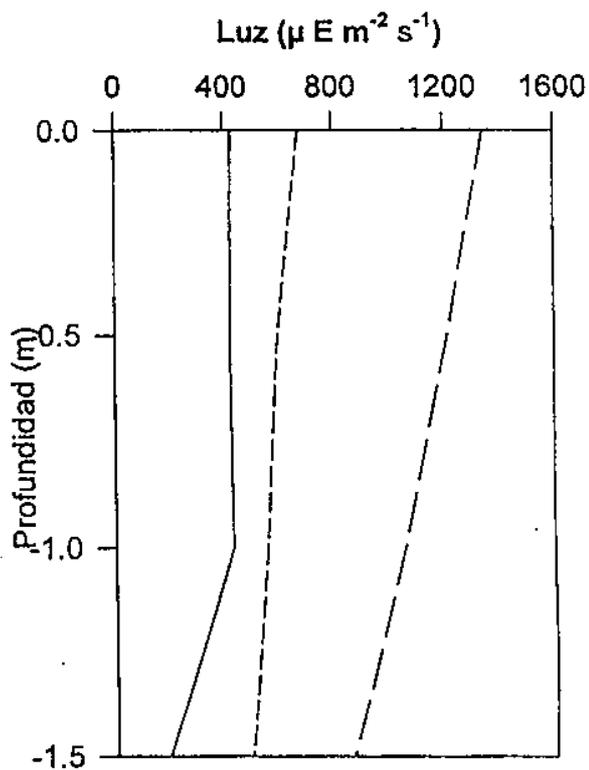
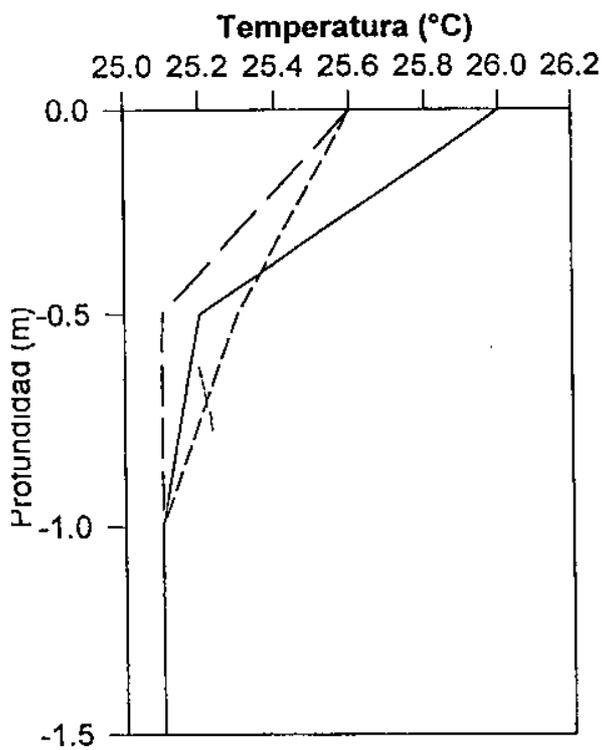


Figura 6. Xcachel.



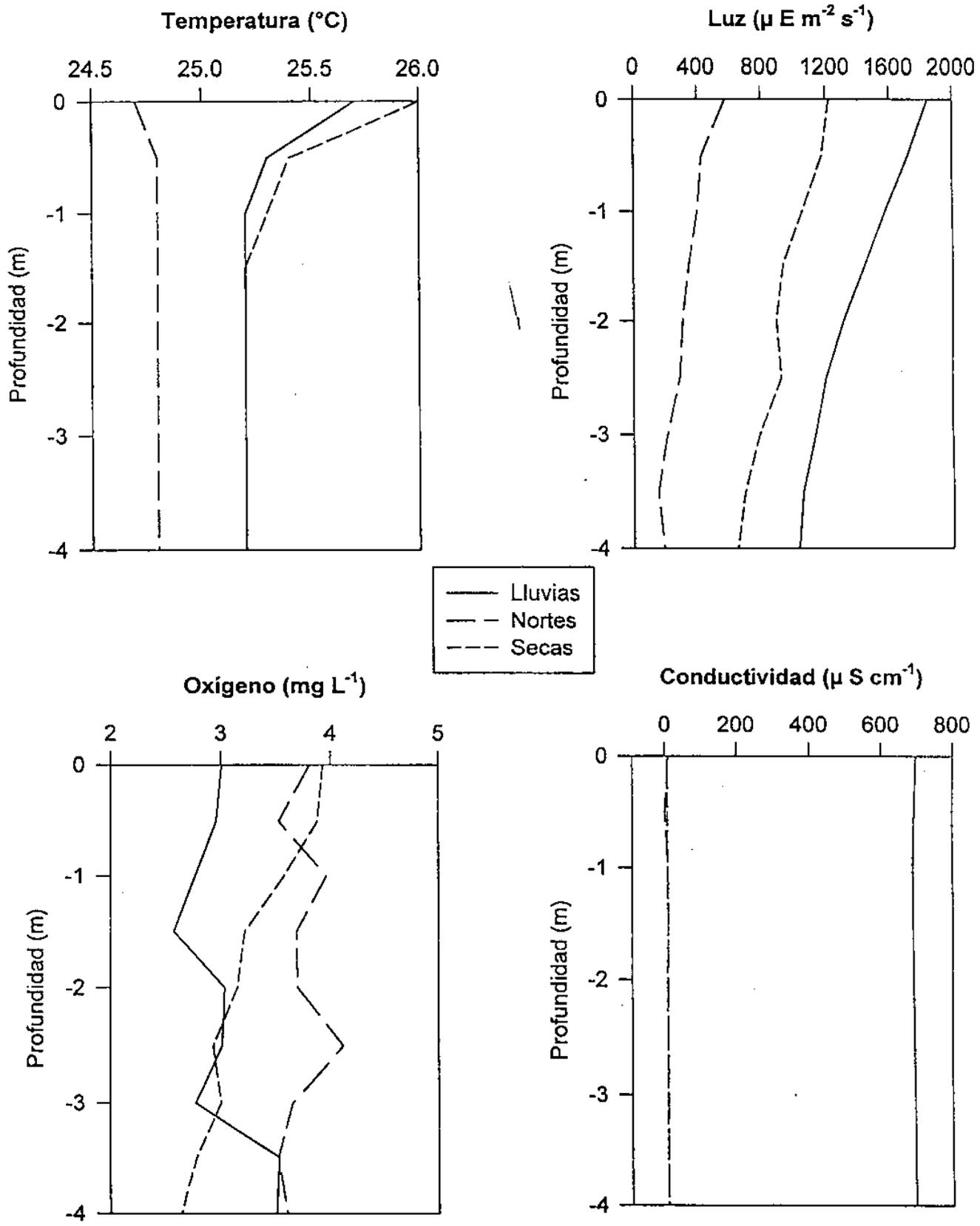


Figura 8. Cristalino.

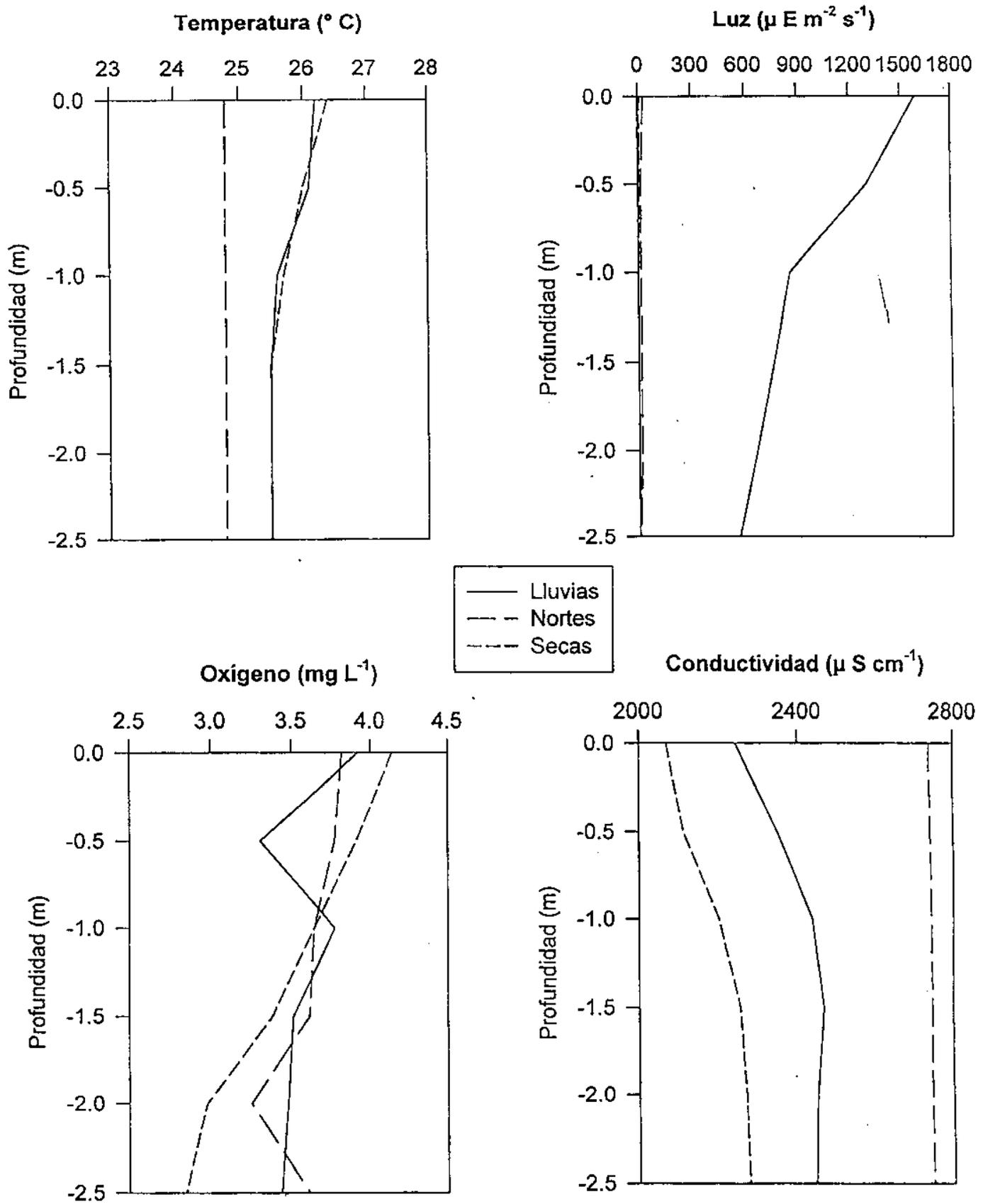


Figura 9. Chacmol.

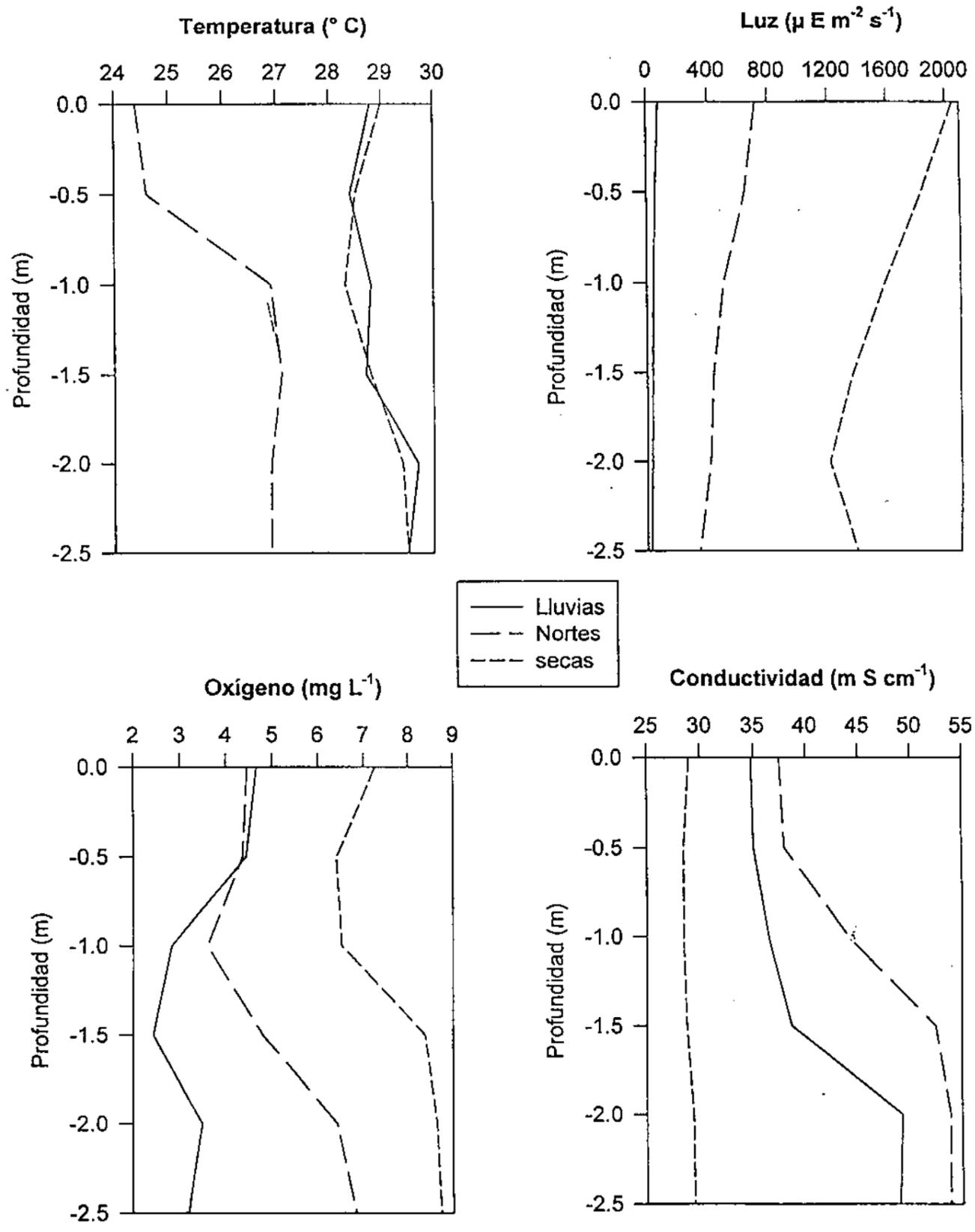


Figura 10. Calica.

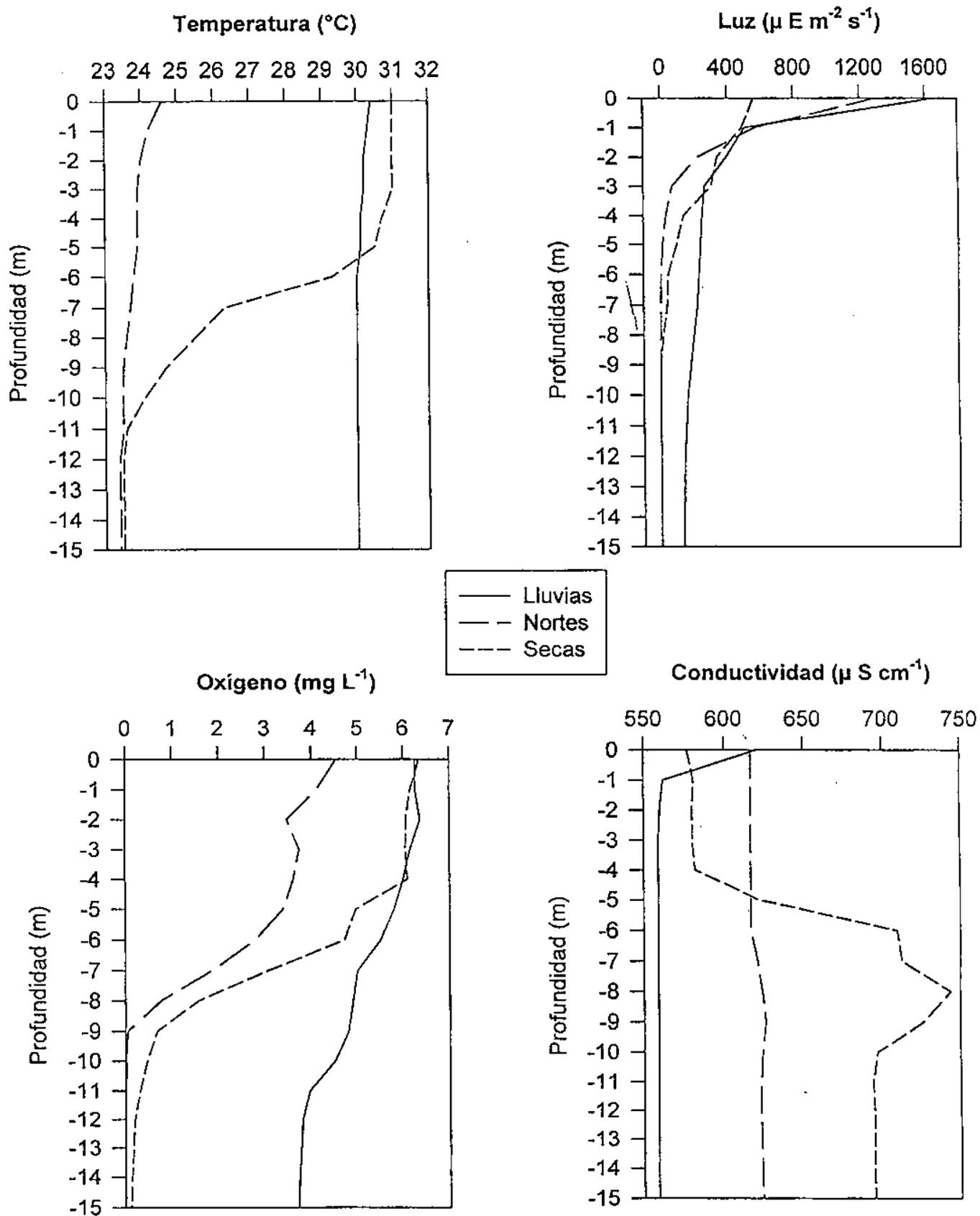


Figura 11. Leona Vicario.

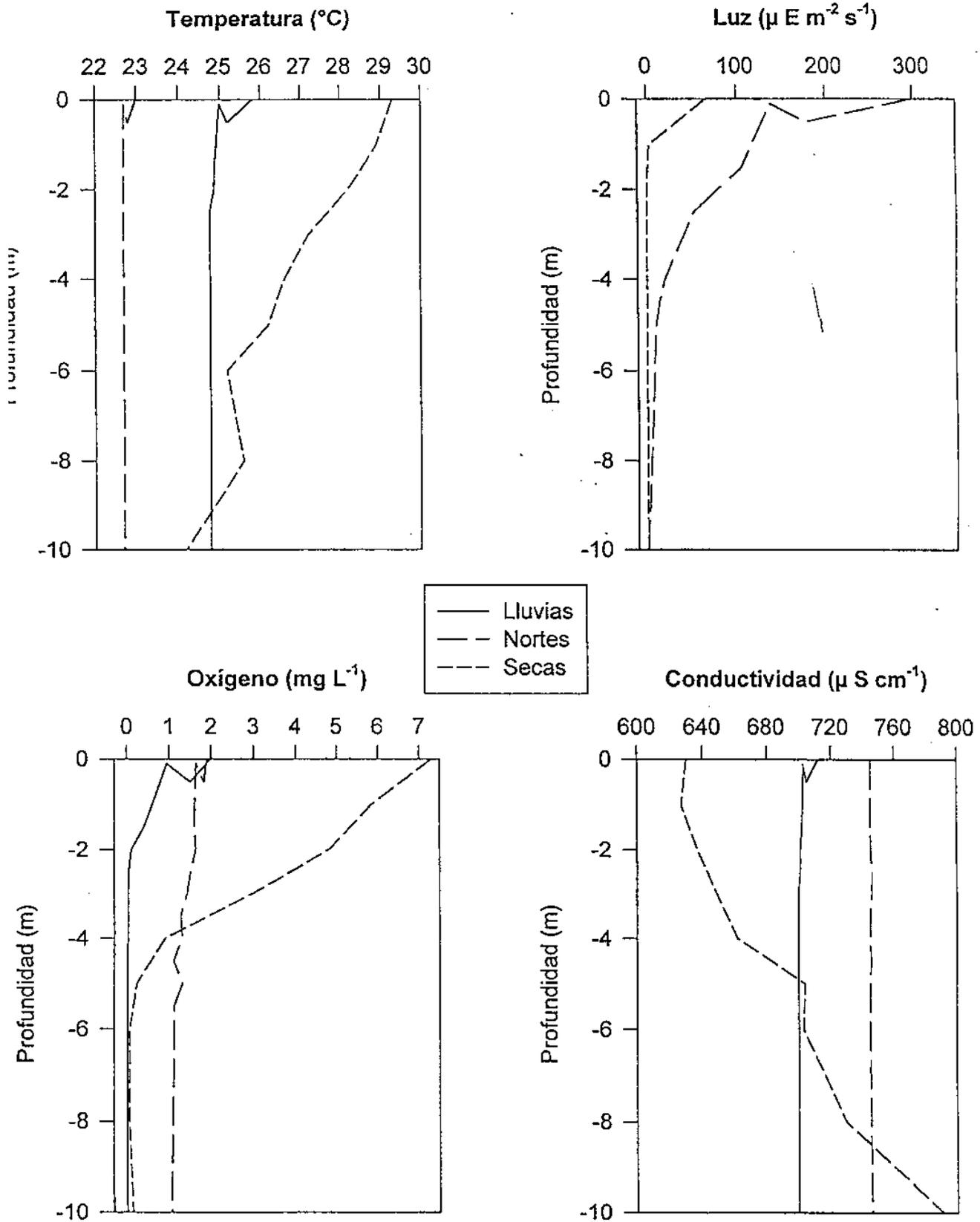


Figura 12. Sierra.

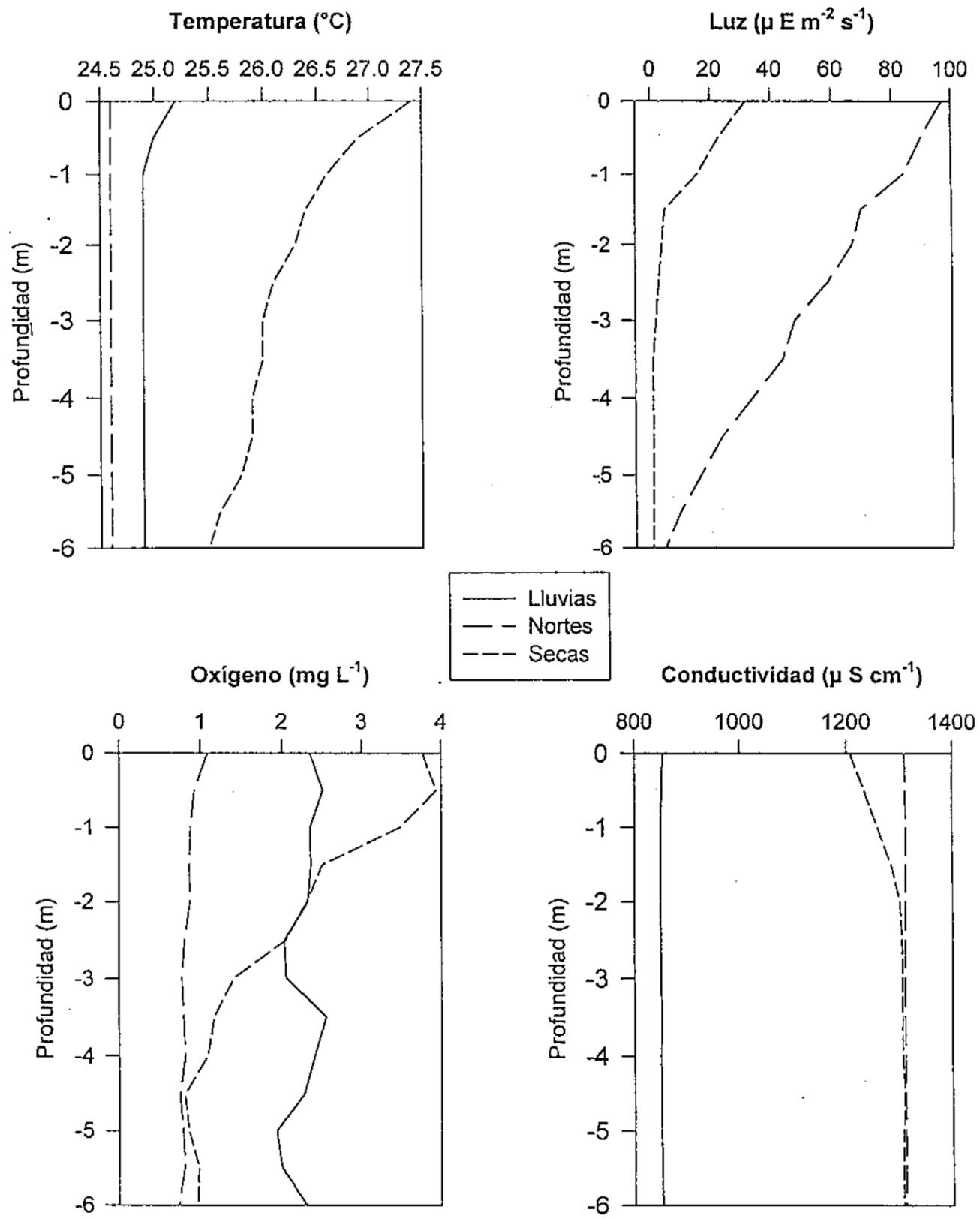


Figura 13. Azul (Colonia Yucatán).

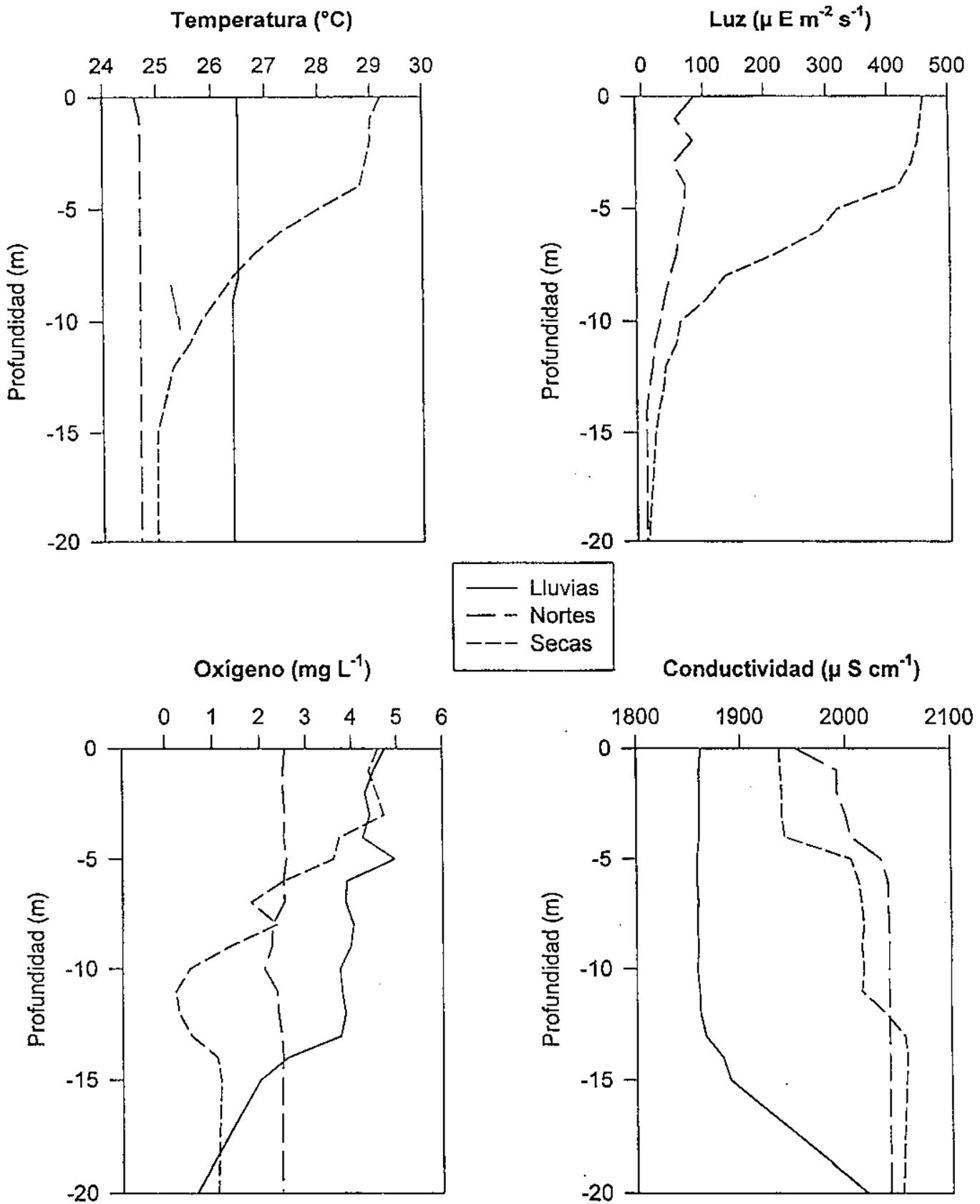


Figura 14. Kikil.

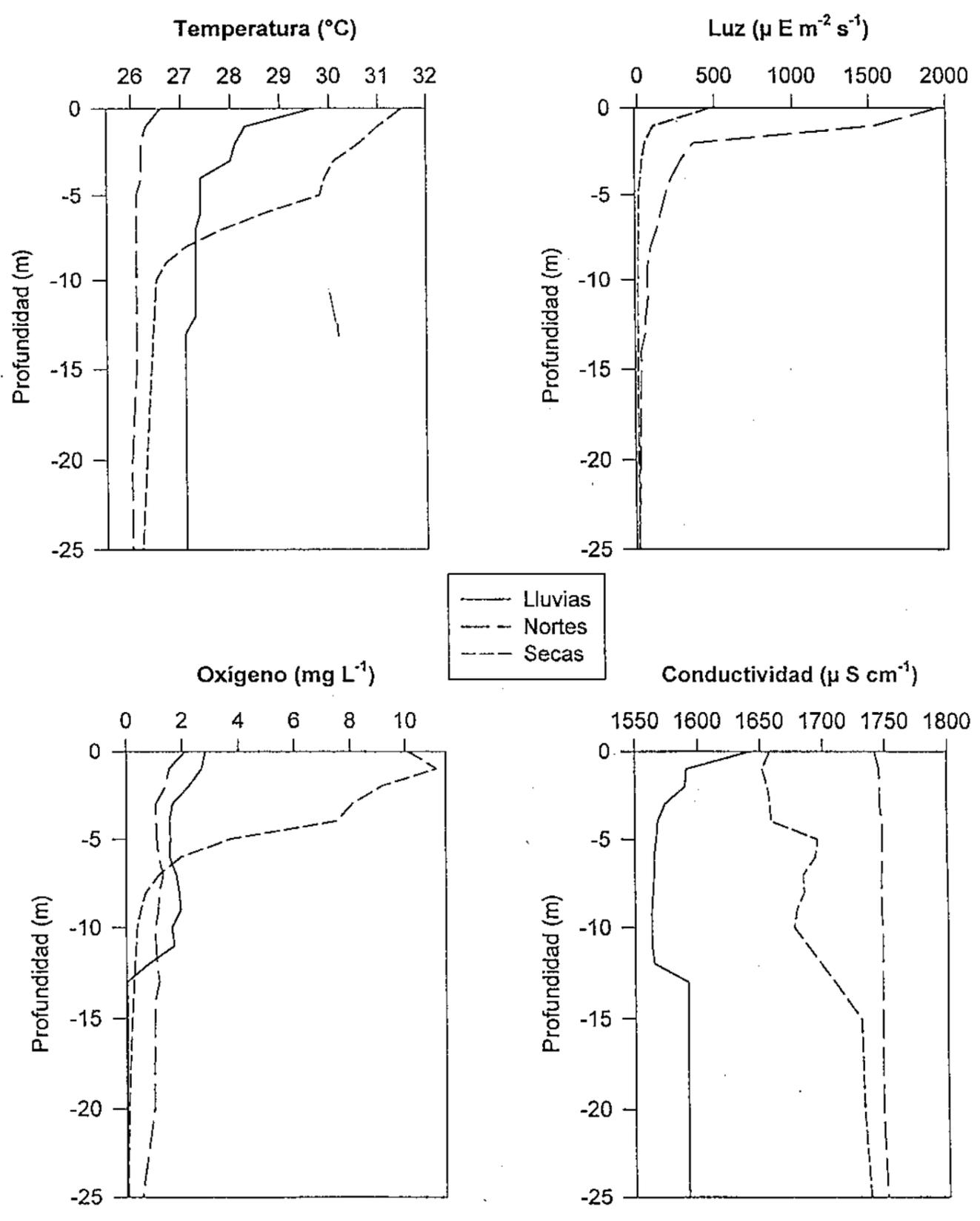


Figura 15. Trejo.

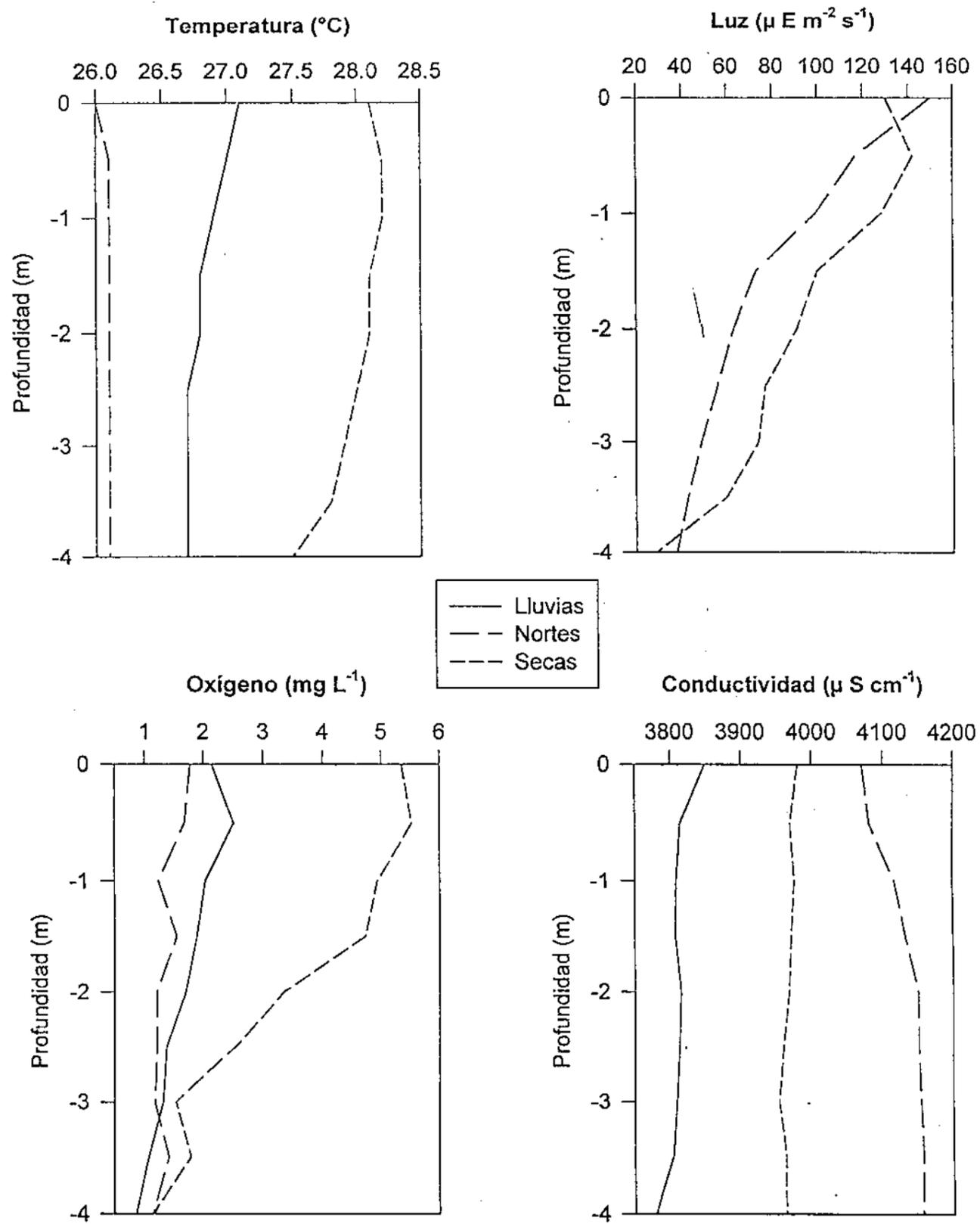


Figura 16. Cervera.

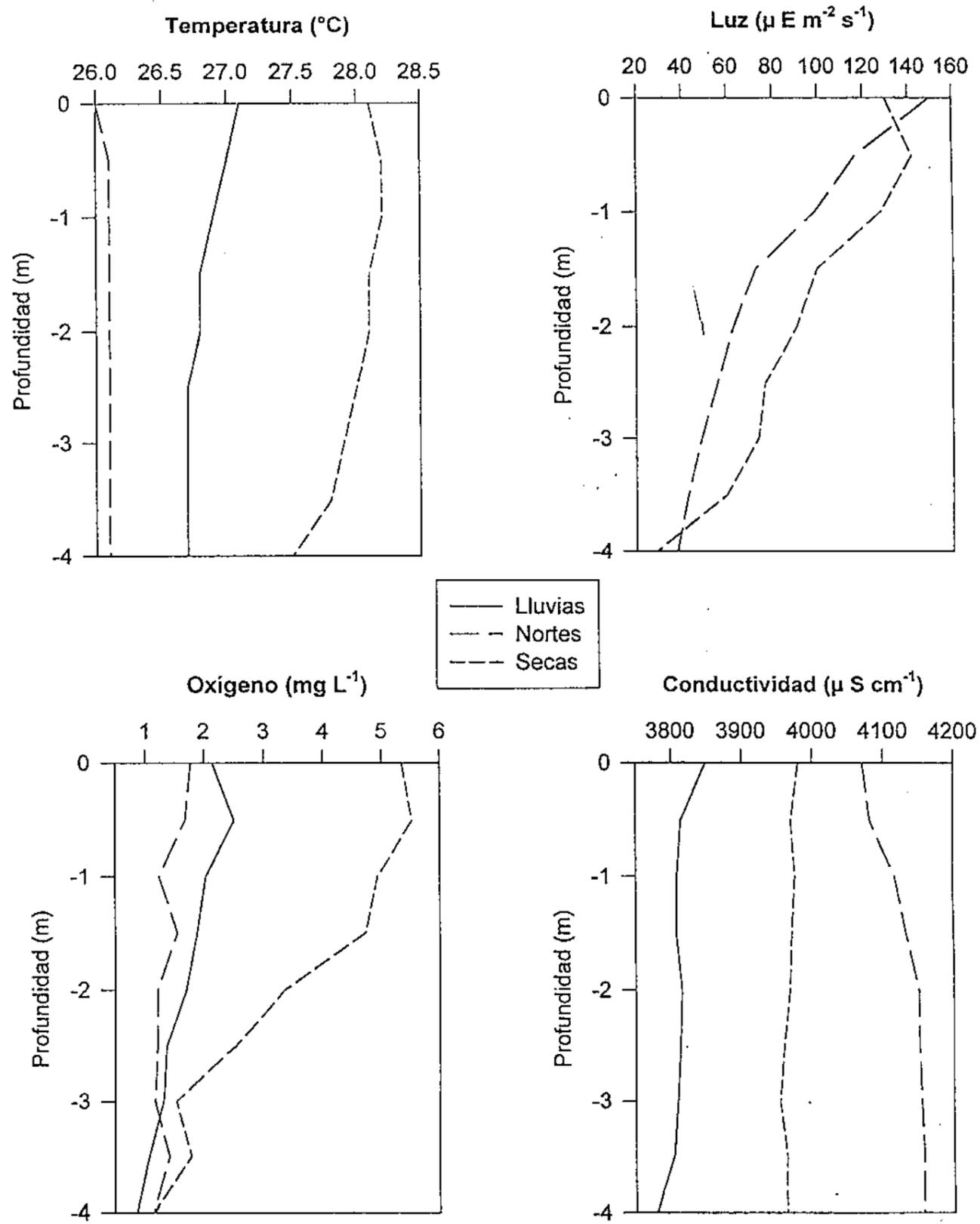


Figura 16. Cervera.

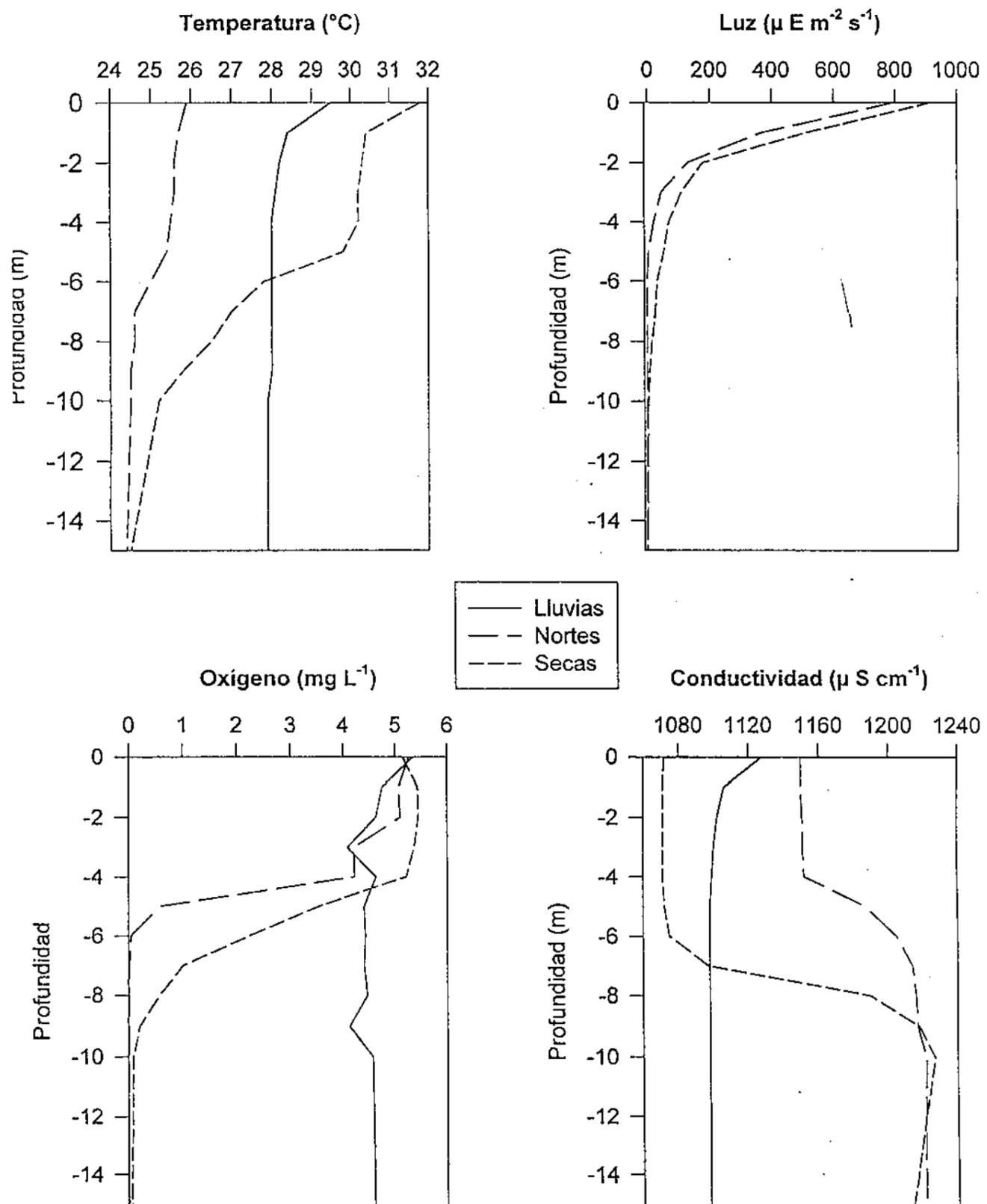


Figura 17. Buctzotz.

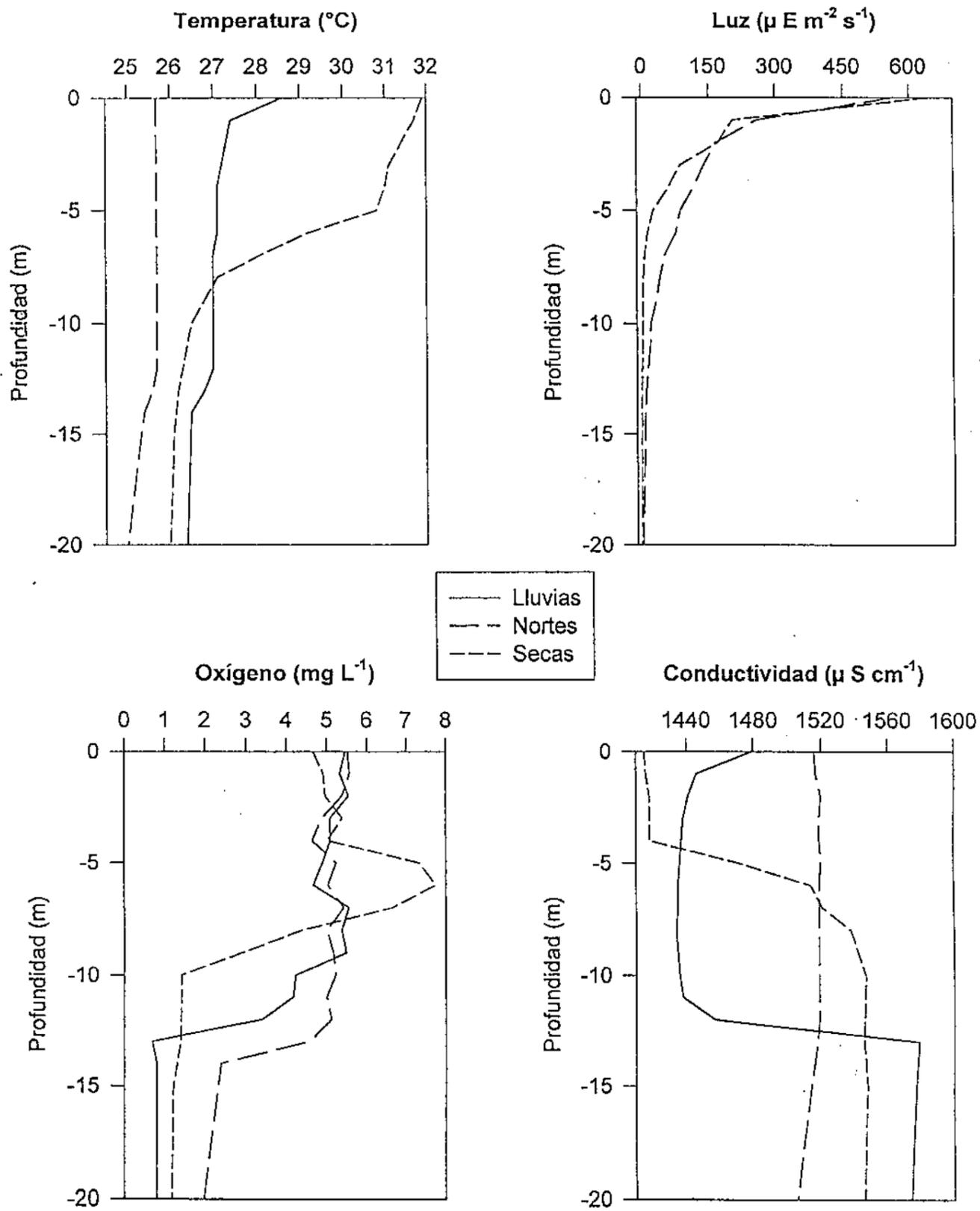


Figura 18. Tuzic.

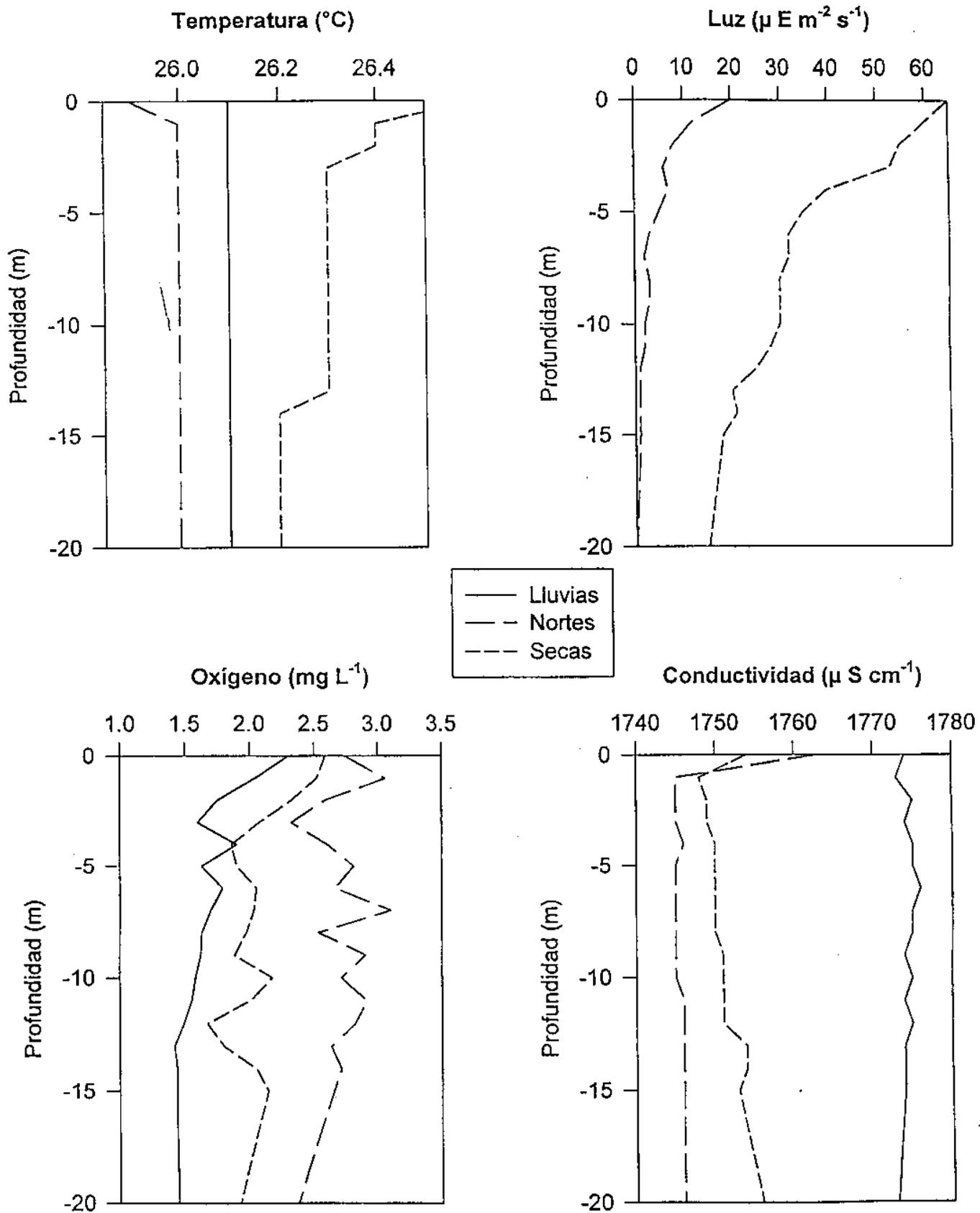


Figura 19. Ixil.

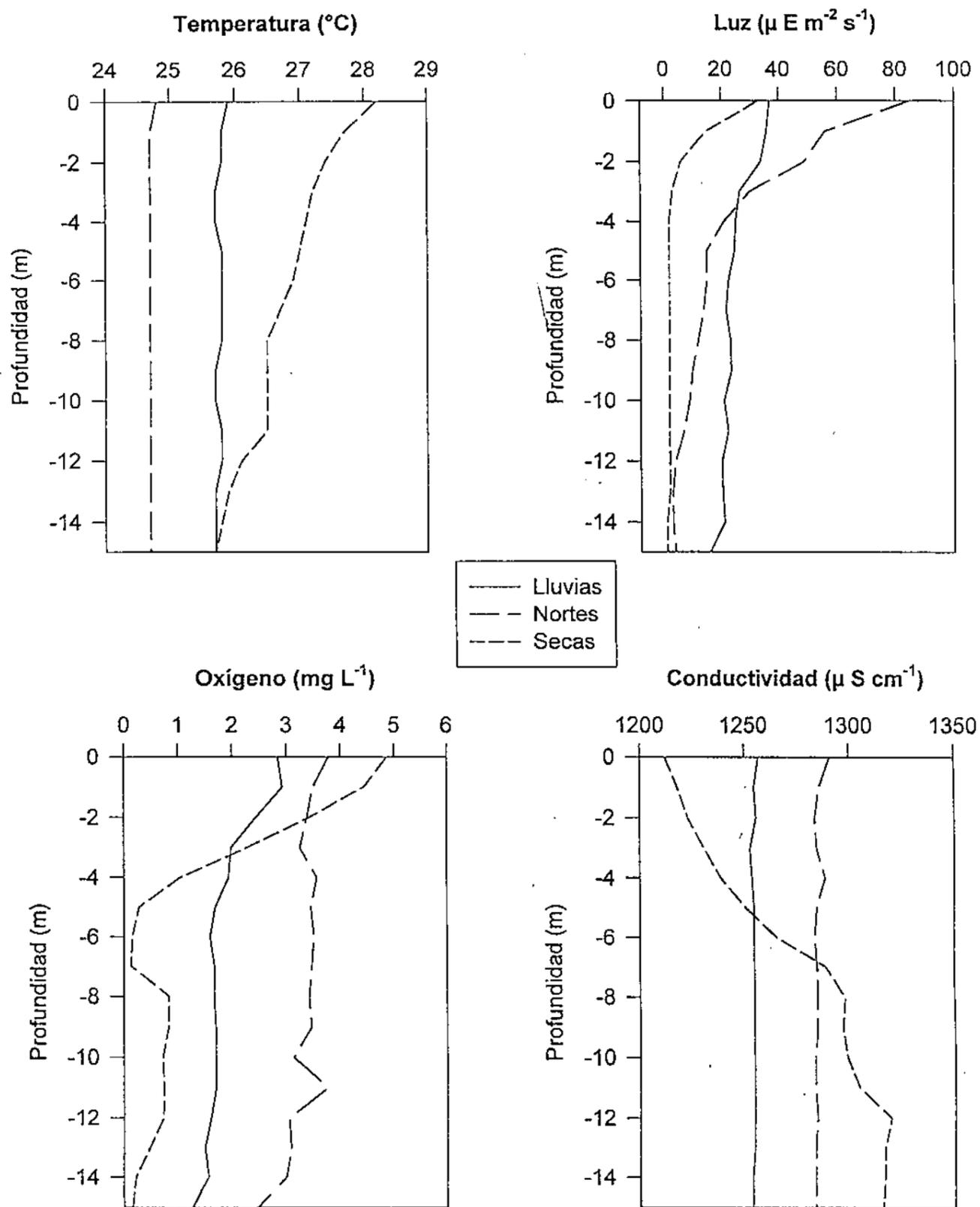


Figura 20. Zaci.

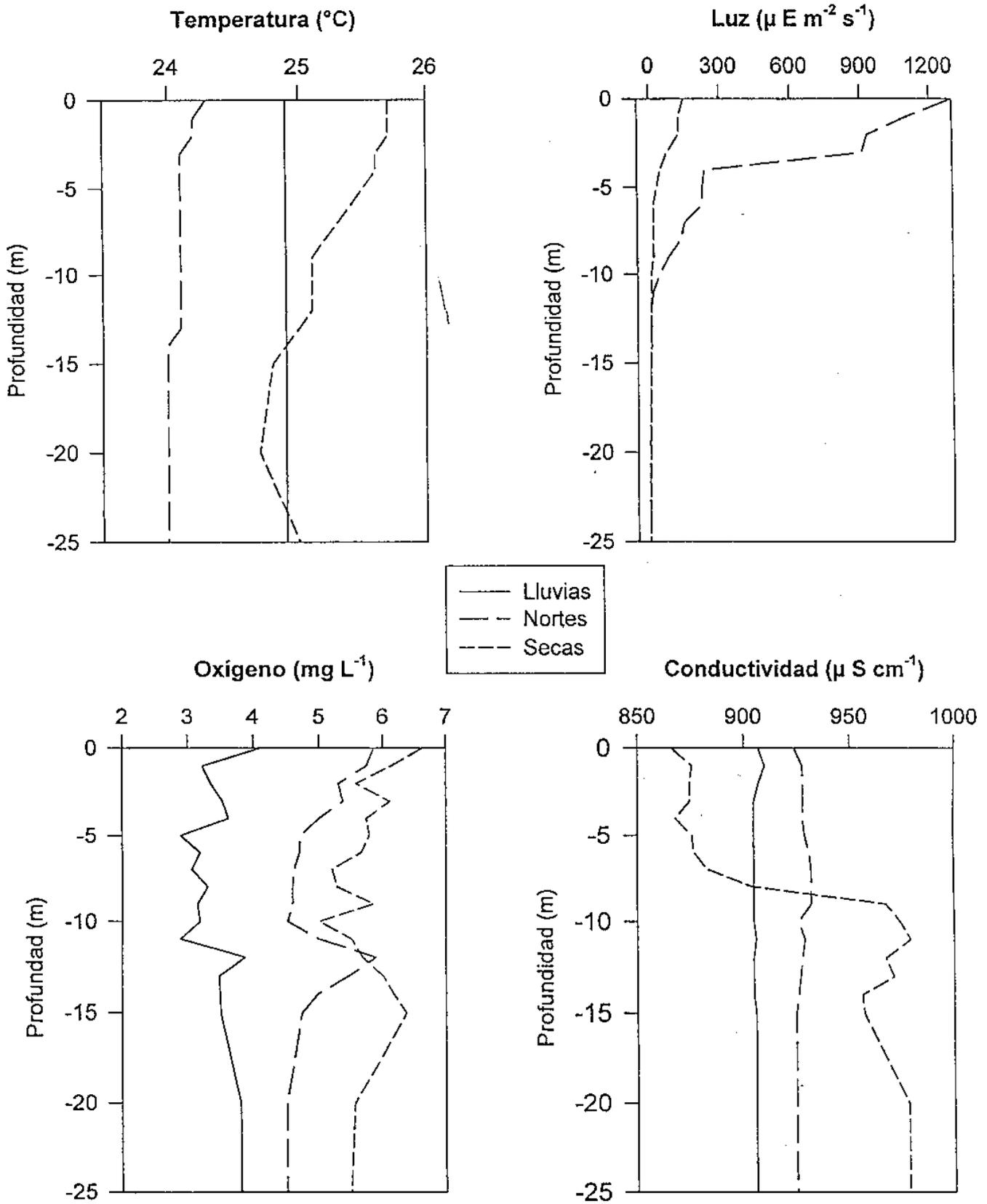


Figura 21. Ikkil.

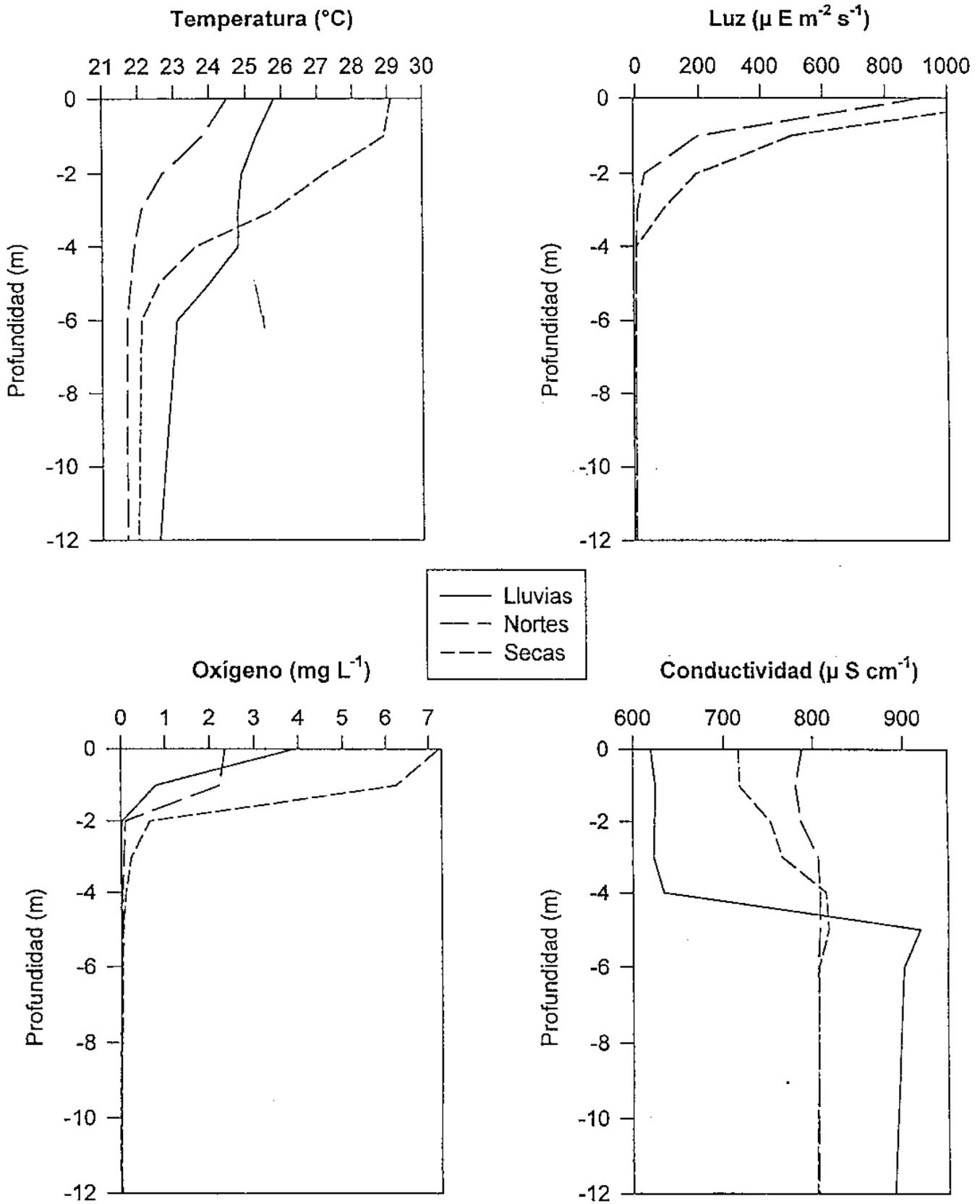


Figura 22. Xtolok (Mayaland).

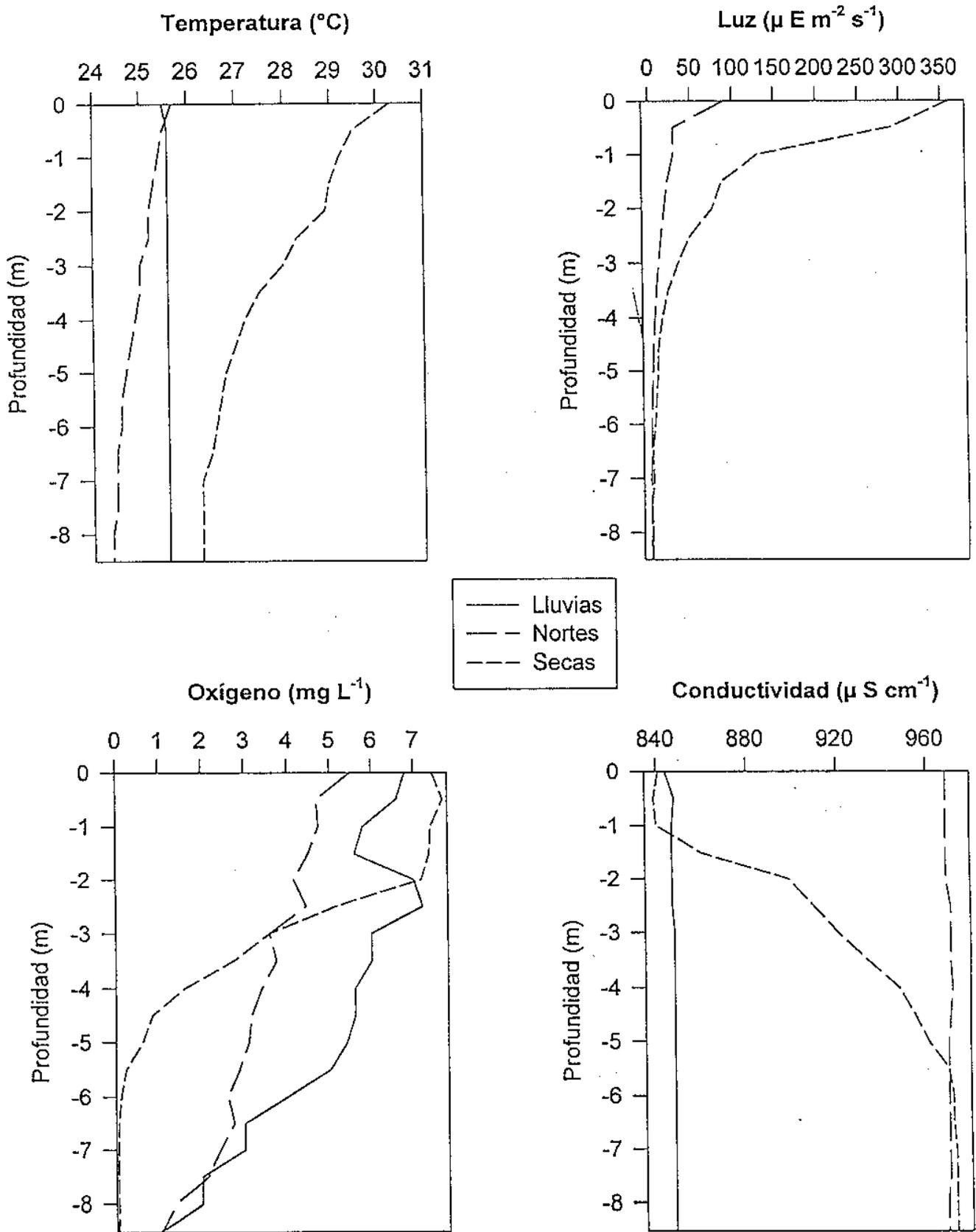


Figura 23. Xtogil.

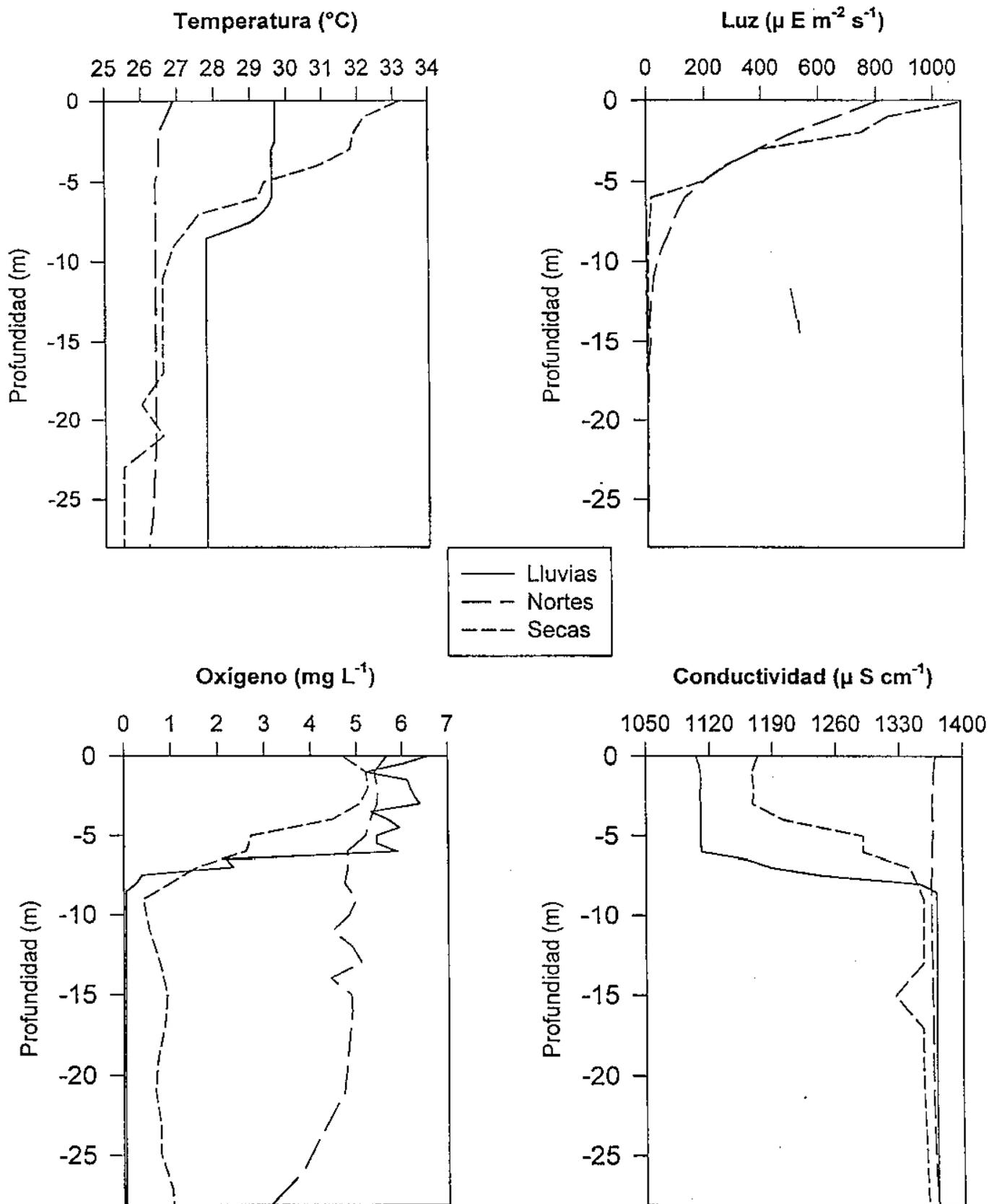


Figura 24. Xcolac.

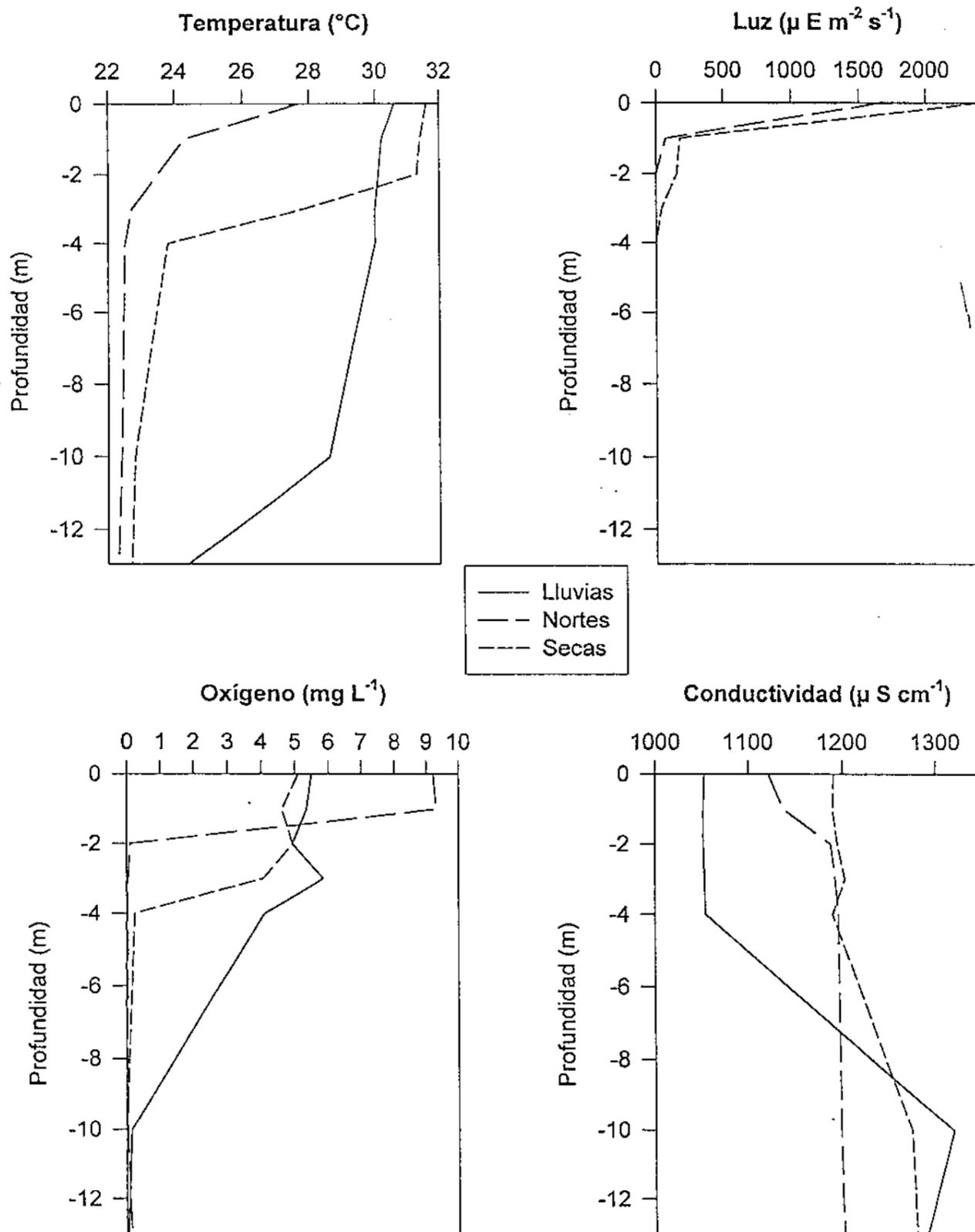


Figura 25. Hotzo.

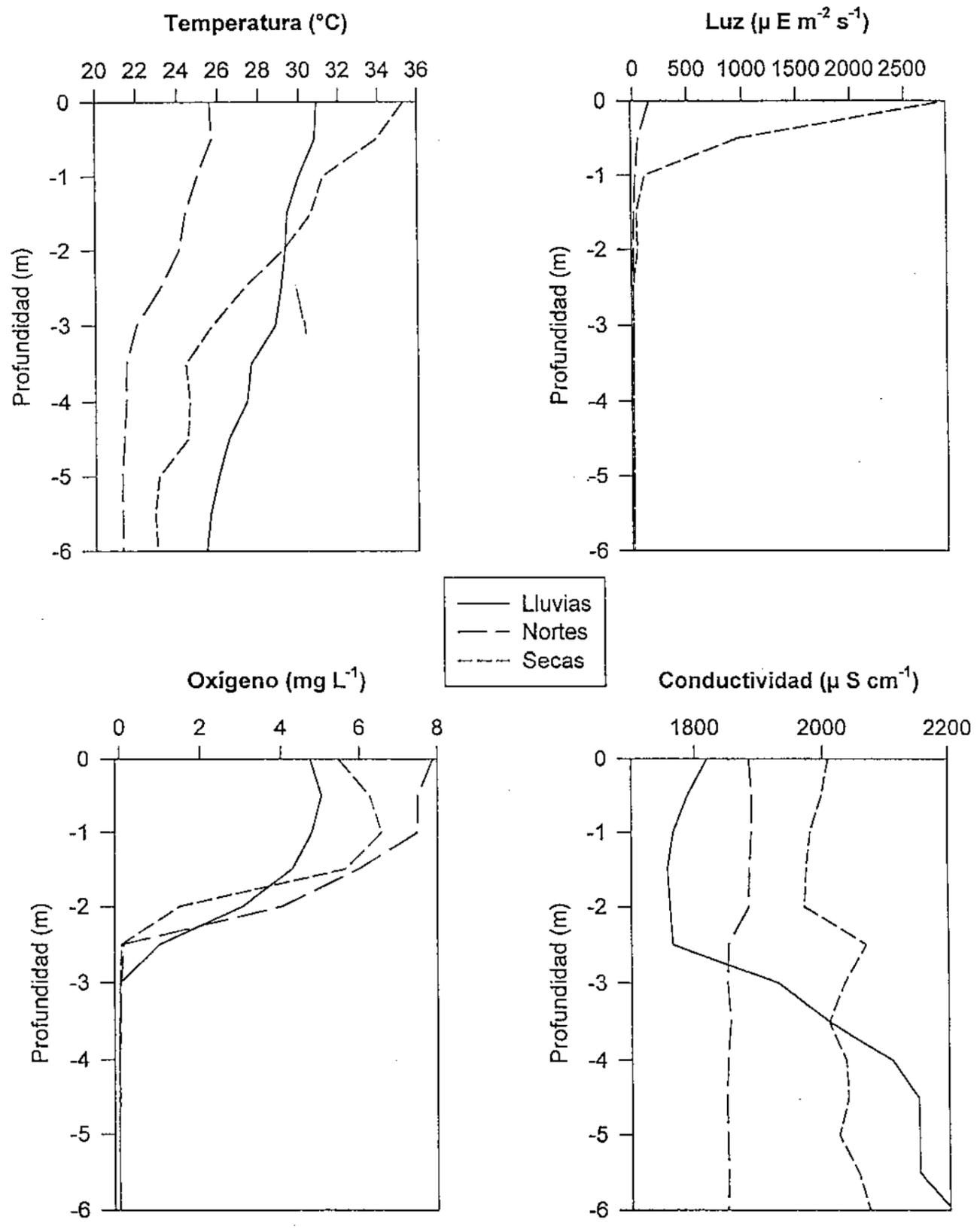


Figura 26. Curva Xcolac.

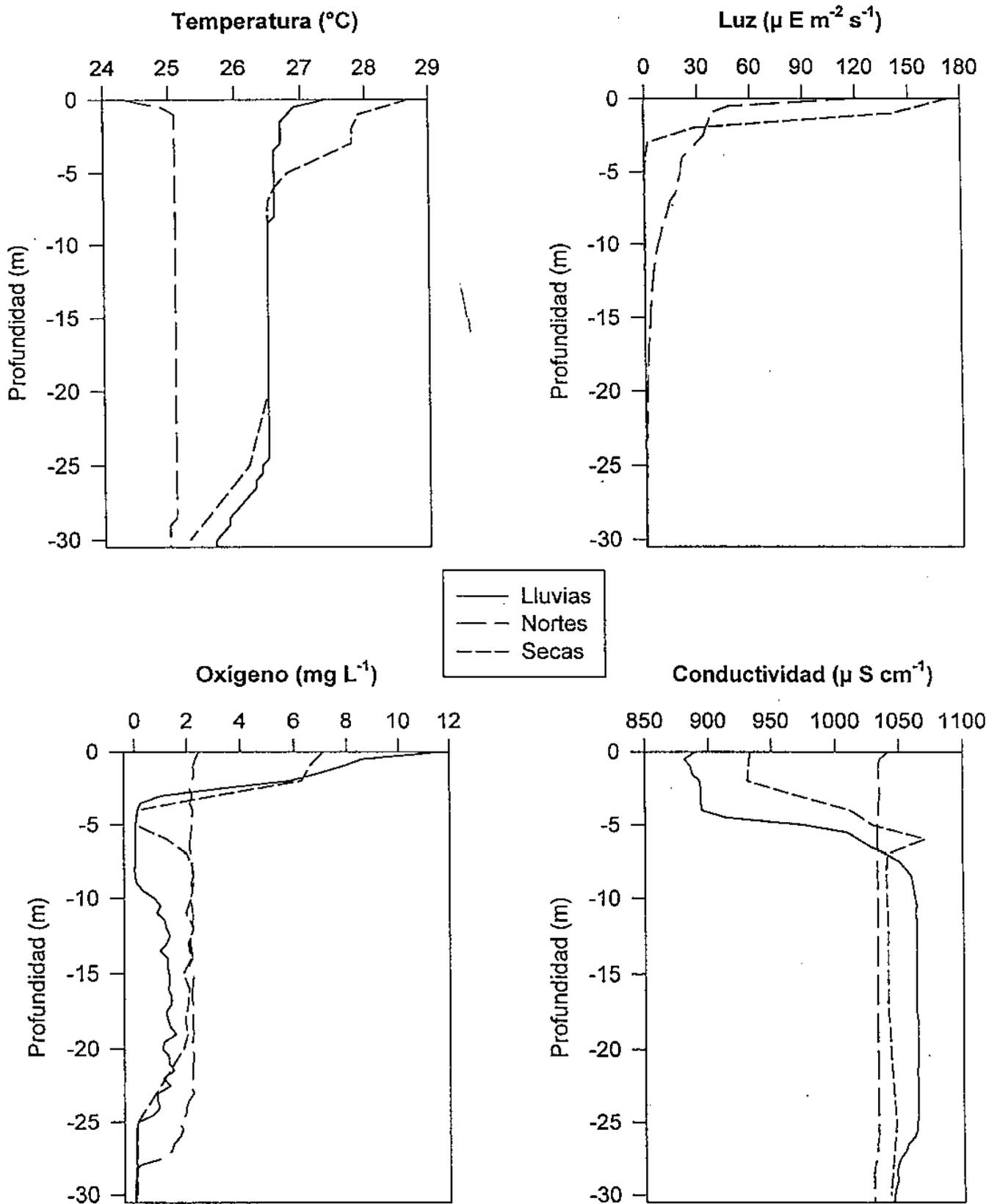


Figura 27. Ixinha.

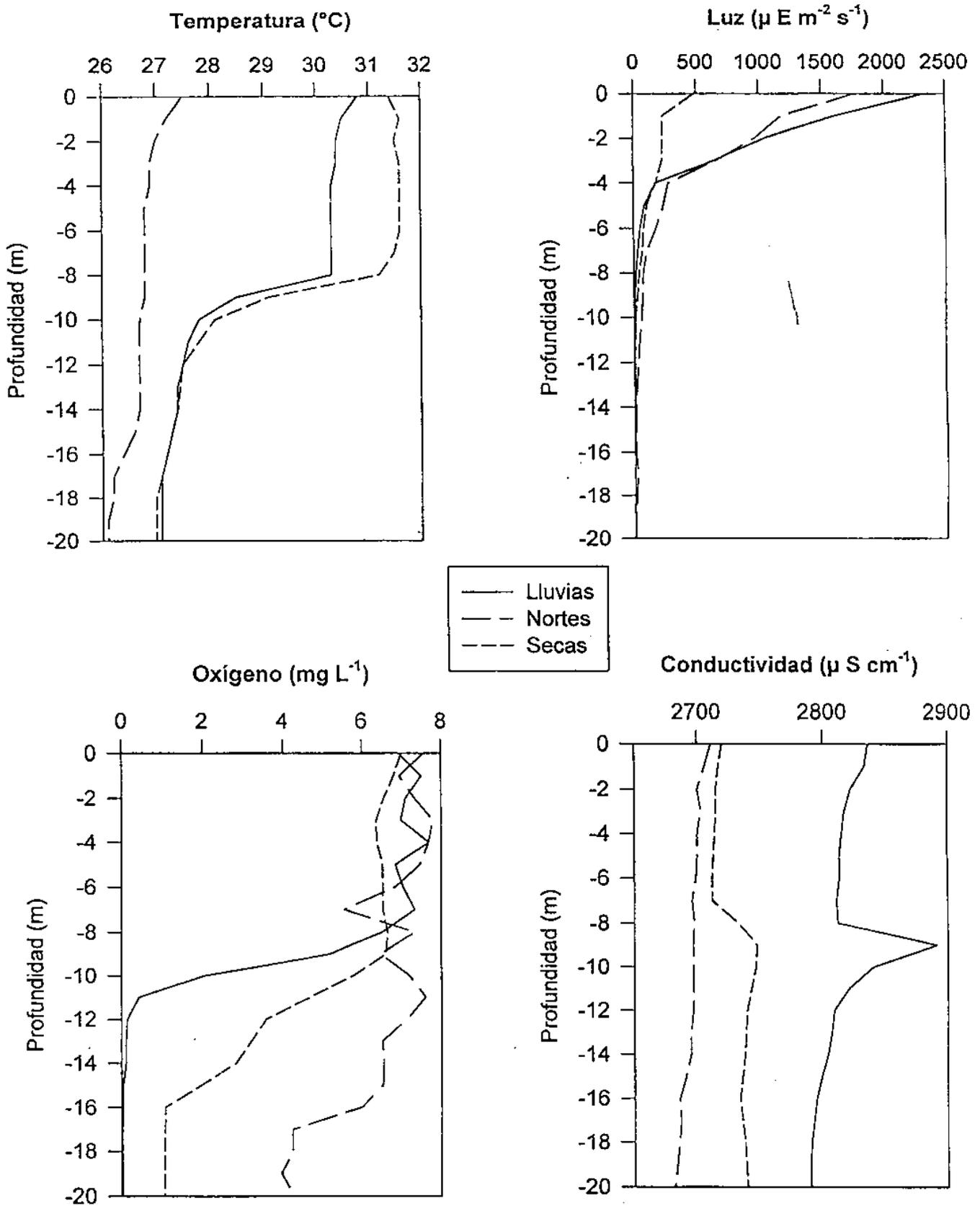


Figura 28. Chen Ha.

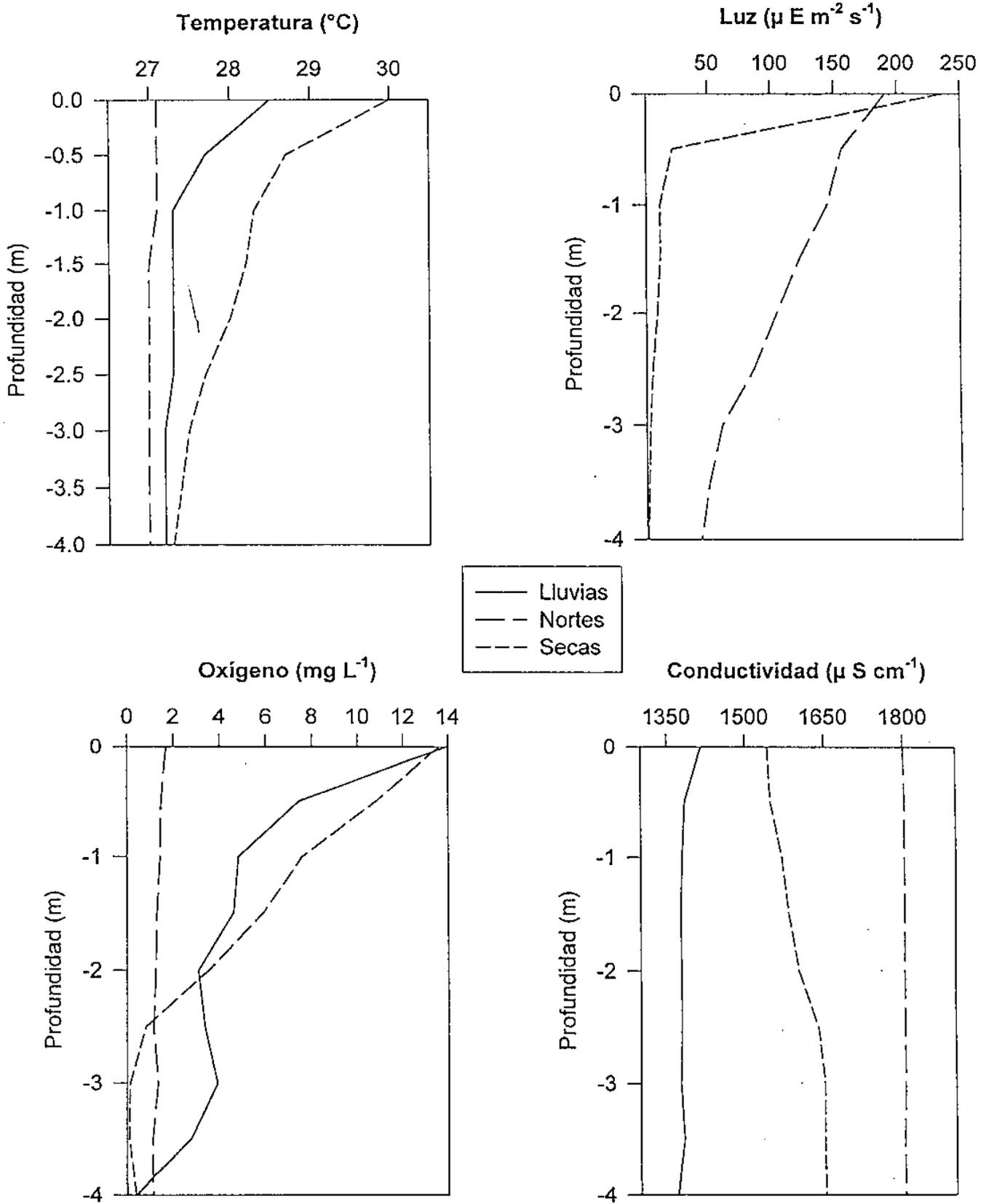


Figura 29. Dzitya.

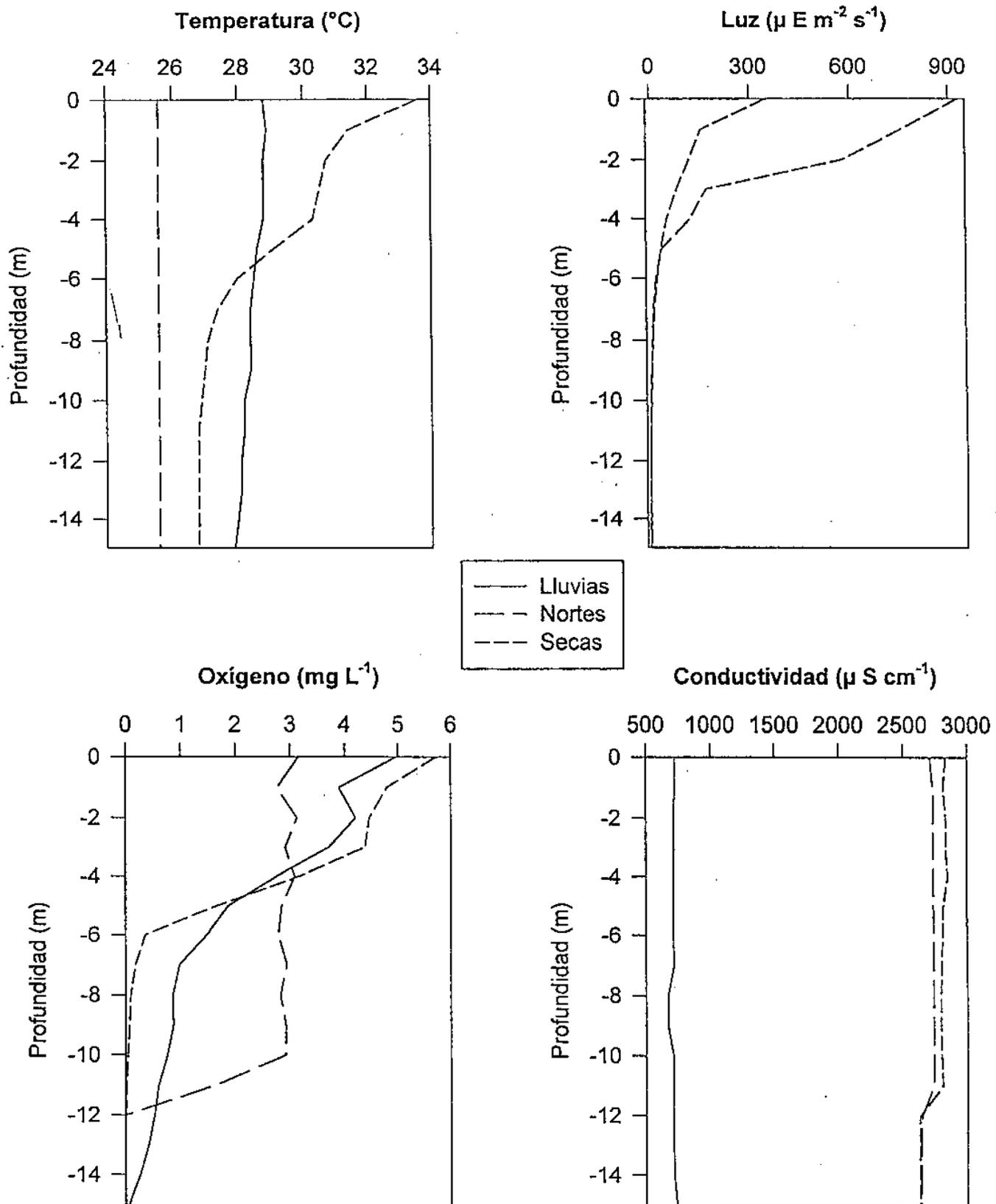


Figura 30. Chunchucmil