

## APLICACIÓN DE UN MODELO DE CORRELACIÓN ENTRE LAS VARIABLES TEMPERATURA, DENSIDAD Y OXÍGENO DISUELTO PARA LA IDENTIFICACIÓN DE TERMOCLINA EN LA ESTRATIFICACIÓN TÉRMICA

### APPLYING A CORELATION MODEL AMONG THE VARIABLES TEMPERATURE, DENSITY AND DISSOLVED OXYGEN IN THE THERMOCLINE IDENTIFICATION IN A THERMIC STRATIFICATION

LIC. HUGO A. ROJAS<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Docente Investigador de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. UNA hugorojas@facen.una.py, www.facen.una.py, facen@facen.una.py

---

**Resumen:** Este trabajo tiene la finalidad de estudiar la Calidad del agua en el embalse Yacyretá a cota 76, en lo que hace a la Estratificación Térmica, mediante el estudio de más de 600 perfiles de Oxígeno disuelto Vs. Temperatura, entre abril/1994 y abril/2006. Los perfiles fueron desarrollados en cinco estaciones del curso principal y entre los años 1996-1997, en los sub-embalses Aguapey y Yacarey. La temperatura y la concentración de oxígeno disuelto se midieron cada metro, desde los 0,50 de la superficie hasta 0,50 m antes del sedimento. Los datos, son tratados en una matriz Excel, correlacionando la temperatura del agua y el oxígeno disuelto (mg/l), % de saturación absoluta y relativa, la presión y la densidad del agua. Los resultados de la matriz son graficados, agrupando temperatura y densidad, oxígeno disuelto en % de saturación absoluta y relativa, a distintas profundidades. El cierre del embalse significó remoción de materia orgánica y procesos de oxidación-estabilización, dando por resultado el consumo de oxígeno en los estratos inferiores que nunca fue muy grande ni persistente. En los valles de inundación se dieron deflexiones más intensas de oxígeno, con pronta reposición hacia valores más favorables. En el curso principal, el oxígeno permanece constante o con incrementos en décimas con la profundidad. La temperatura aparece generalmente Isotérmica y en otras decrece unas décimas en los primeros metros, permaneciendo luego con un mismo valor hasta el fondo. En los meses de verano, se tuvieron incrementos de la temperatura, debido al calentamiento del agua en la capa superficial, dado por la incidencia solar directa, propia de la época y de la hora de la medición, produciéndose el enfriamiento inmediato, en algunas décimas, en las capas más profundas. La estación Pto. Valle, es la que recurrentemente presentó el mayor gradiente termal, como también la máxima temperatura media de la columna, generalmente en los meses calurosos, entre octubre y enero, dándose la máxima diferencia termal, de 4,5 °C, medidos en trece metros, repitiéndose esa característica con periodicidad anual. En el centro del lago, estación Jesuitas, el desarrollo del perfil fue más estable, con poca diferencia desde la superficie hasta el fondo, resultando Isotérmica la mayor de las veces. Es posible afirmar, que no se dieron las condiciones para la formación de Estratificación Térmica en el Embalse. No se ha evidenciado ninguna diferencia sustancial en el Gradiente Termal, que sugiera formación de Termoclina, aunque si en forma muy lábil, en los Sub embalses laterales, con rápida respuesta hacia la producción de una mejor forma.

**Palabra clave:** Estratificación, Densidad, Temperatura

**Abstract:** This work has the end to study the quality of the water in the Yacyretá dam to habergeon 76, in which does to the thermal stratification, by means of the study of but of 600 profiles of oxygen dissolved vs. temperature, from April/1994 to April/2006 the profiles were developed in five stations of the main course and between the years 1996-1997, in the sub-dam Aguapey and Yacarey. The temperature and the concentration of oxygen dissolved measured to him each meter, from the 0.50 to 0.50 m before the sediment. The data are treated in an Excel matrix elaborate, by correlating the temperature of the water and the dissolved oxygen (mg/l), % of absolute and relative saturation, the pressure and the density of the water. The results of the matrix are graphic, by grouping dissolved temperature and density, oxygen in % of absolute and relative saturation, to different depths. The closing of the dam meant discharge of organic matter and oxidation processes-stabilization, considering result the consumption of oxygen in the lower stratum that never was very big or persistent. In the valleys of flood they give more intense deflections of oxygen, with prompt replacement towards more favorable values. In the main

course, the oxygen remains constant or with increments in tenths with the depth. The temperature is the major of the Isothermal times and in other decreases some tenths in the first meters, remaining then with a same value until the bottom. In the months of summer, had increments in the temperature, due to the heating of the water in the superficial cloak, given for the solar direct, own incidence of the time and of the hour of the measurement, by producing the immediate cooling, in some tenths, in the more deep cloaks. The Pto.Valley station, it is she who recurrent presented the major thermal gradient, as also the maximum stocking temperature of the column, generally in the hot months, between October and January, giving the maximum thermal difference, of 3.0 and 4.5 °C, measured in thirteen meters, repeating that characteristic with annual periodicity. On the other hand, in the center of the lake the station Jesuits canal, the development of the profile was more stable, with little thermal difference from the surface to the button, resulting Isothermal the major of the times. It is possible to affirm that not gave to him the conditions for the formation of the thermal stratification in the dam. It has not made evident any substantial difference in the thermal gradient, that it suggests formation of termoclina, although if in form very labile, in the Sub it dams throw-ins, with quick answer towards the production of a better form.

*Key Words: Stratification, Density, Temperature*

## INTRODUCCIÓN

Siendo el agua al mismo tiempo indispensable y la más abundante en el protoplasma celular, cabría decir que toda vida es “acuática”, sin embargo, en la práctica hablamos de un hábitat acuático, como aquel en que el agua es el medio principal tanto externo como interno. Su importancia para el hombre es fundamental, considerándose frecuentemente en dos series, aunque no hay límites estrictos entre ellas, como agua quieta o leníticos, o agua corriente o lóticos. (Odum, E. P. 1987)

El alto calor específico del agua líquida y el alto calor latente de evaporación, traen como consecuencia las cantidades relativamente altas de energía en forma de calor, necesarias para afectar las propiedades químicas del agua. Estas condiciones de requerimiento y retención de calor, confieren un ambiente muy estable y las fluctuaciones de la temperatura se dan en forma muy gradual con los extremos estacionales y diurnos pequeños.

Los lagos tropicales con altas temperaturas superficial (20-30 °C), presentan gradientes débiles y poco cambio estacional. Las diferencias de densidad, producirían estratificación estable, convirtiéndose en una propiedad importante. La regulación de toda la dinámica física y química del hábitat y el metabolismo resultante está dirigida por estas diferencias, pequeñas pero altamente significativa, aumentando conforme la temperatura se va alejando de 4 °C, aproximadamente lineal al aumentar la

concentración de sales disueltas. Las variaciones producidas por la salinidad son pequeñas pero significativas, por la posibilidad de acumulación de sales y la disminución de la temperatura de densidad máxima. (Wetzel, R. G. 1981)

En la estratificación, las aguas frías y duras yacen bajo estratos tibios y más livianos, dividido por una zona intermedia donde la temperatura desciende rápidamente con la profundidad, siendo la termoclina en estas condiciones el plano o superficie en la cual la tasa de disminución de la temperatura con respecto a la profundidad es máxima. (Wetzel, R. G. 1981)

La estratificación persiste, con las diferencias de densidad impartidas por la temperatura. La fuerza eólica mueve las aguas superficiales, generando mezclas y corrientes proporcionales a la intensidad del viento que en caso de vientos suaves, no pueden romperlo permaneciendo estable (Wetzel, R. G. 1981). Durante la noche, debido a corrientes de convección, ocurre la mezcla, ya que al enfriarse el agua superficial que estuvo expuesta a la radiación solar, se vuelve más densa y se hunde. Las aguas superficiales también se enfrían, con un cambio meteorológico como viento frío y lluvia, o variaciones estacionales. Esta circulación se ve reforzada por las corrientes de convección provocadas por el enfriamiento nocturno y o estacionales y por evaporación. La presión hidrostática igualmente puede influir, aumentando con la profundidad, induciendo a una

Temperatura	Densidad de la 2ª temp. g/ cm <sup>3</sup> x 10 <sup>7</sup>	Cambios de densidad	Cociente
4-5	9999919	-81	1,00
24-25	9970739	-2517	31,17

**Tabla 1.** Cambios de densidades del agua en función de la temperatura.

disminución de la temperatura de densidad máxima. (Margalef, R. 1983)

En este trabajo se establece como objetivo general el estudio de la calidad del agua en el Embalse de Yacyretá referente a la estratificación térmica operando a cota 76 metros sobre el nivel del mar desde abril 1994 a abril 2006, con el estudio de más de 600 perfiles de oxígeno disuelto y temperatura, identificando la formación de termoclina aplicando un modelo de correlación entre las variables profundidad, temperatura, densidad, oxígeno disuelto en porcentaje de saturación absoluta y relativa, efectuando un diagnóstico sobre las potenciales áreas para una condición futura.

#### *Temperatura del agua y densidad*

El calor proveniente de la absorción de la energía solar, influye sobre un conjunto de propiedades químicas, físicas y biológicas. La energía solar de baja frecuencia es absorbida en más de la mitad, en los dos primeros metros de agua y lo calienta. La retención o pérdida de calor, está ligada a factores que influyen en su distribución dentro del sistema como la energía eólica y las corrientes. Estas diferencias de temperaturas son significativas, por los cambios de densidad. A presión normal, el agua es más pesada a 4 °C, cuando 1 ml tiene una masa de 1 g, volviéndose más liviana a medida que se enfría por debajo de esta temperatura. La densidad del hielo puro a 0 °C es de 0,9168, en comparación con la del agua en estado líquido, 0,9987, cerca de 8,5 % menor, consecuentemente el hielo flota. (Wetzel, R. G. 1981)

La densidad del agua aumenta hasta un máximo de 1,0000 a 3,94 °C, después de lo cual se produce una disminución. Es importante observar la dife-

rencia de densidad con la disminución de cada 1 °C necesitándose trabajo físico para efectuar la mezcla. En la **Tabla 1**, se muestran los cambios de densidades en función de la temperatura. Entre 24-25 °C el cambio es de 2517 x 10<sup>-7</sup> y entre 4-5 °C es de 81 x 10<sup>-7</sup> (adaptada de Cole, G. A. 1983)

Haciendo la relación entre el cambio de densidad entre temperaturas adyacentes y entre 4-5 °C e ignorando los signos, 2517/ 81 = 31,07. Bajo esas condiciones, el cambio de densidad entre 24 y 25 °C es 31 veces superior al cambio entre 4 y 5 °C. (Cole, G. A. 1983)

Las desviaciones desde la temperatura de densidad máxima producen cambios muy pequeños de densidad, si se dan las condiciones de enfriamiento por debajo de 4 °C o un calentamiento por encima. La presión hidrostática se acrecienta a razón de una atmósfera por cada 10 metros de profundidad, provocando una disminución de la temperatura de densidad máxima (Cole, G. A. 1983). El calor, se pierde por radiación superficial sujeto a los primeros centímetros, perdiéndose calor por evaporación. Esta tasa aumenta con la temperatura, al disminuir la presión de vapor, al bajar la presión barométrica y al aumentar el movimiento del aire sobre la superficie, perdiéndose por disipación hacia el aire y los sedimentos. El alto calor específico del agua, permite la acumulación de la energía luminosa, al disiparse ésta en forma de calor. (Wetzel, R. G. 1981)

La salinidad de la mayoría de las aguas continentales se encuentra entre 0,1 a 0,5 g/l, con oscilaciones menores de 0,1 g/l., pudiendo la salinidad inorgánica superar los 60 g/l. La salinidad promedio del agua marina es de 35. (Wetzel, R. 1981). Las sales disueltas disminuyen la solubili-

Salinidad ‰	Densidad 4°C
0	1,000000
1	1,000850
2	1,006900
3	1,002510
10	1,081800

**Tabla 1.** Cambios de densidad según el contenido en sales a 4 °C .

dad y para definir la saturación consideramos las aguas interiores como puras con salinidad de 0 ‰ utilizado en este trabajo. La **Tabla 2**, muestra los cambios de densidad según el contenido en sales a 4 °C (adaptado de Wetzel, R. G. 1981)

#### *Oxígeno disuelto*

Es el parámetro más importante, esencial para el metabolismo de los organismos acuáticos aerobio, con mayor solubilidad que el nitrógeno, alcanzando casi un 35%. (Wetzel, R. G. 1981). Es un indicador importante de la calidad del agua, siendo su origen la disolución del oxígeno atmosférico, la fotosíntesis y la re-aireación por agitación. Las principales causas de desoxigenación son las actividades de oxidación biológica y la respiración de los seres vivos.

La solubilidad de los gases en el agua, es modificada por la presión y la temperatura, la salinidad la

disminuye y la presión la aumenta. Se ve afectada de manera no lineal por la temperatura, aumentando considerablemente al disminuir la temperatura del agua. En consecuencia, el equilibrio entre la concentración del oxígeno atmosférico respecto al agua, depende de la presión parcial atmosférica o sea la altitud sobre el nivel del mar. La saturación se considera en relación a la presión en la superficie y la evaluación del % saturación de O<sub>2</sub>, se realiza conociendo el contenido de oxígeno, la temperatura y la altitud o la presión atmosférica (Cole, G. A., 1983). En la **Tabla 3**, se muestra la relación de la solubilidad en agua pura a 760 mm de presión con respecto a la temperatura. (adaptado de Wetzel, R. G. 1981)

La cantidad de gas disuelto, está regida por la presión atmosférica, las condiciones meteorológicas y la presión hidrostática. La cantidad total de gas que se puede encontrar en el agua a una profundidad dada, considerando la suma de las presiones atmosférica e hidrostática constituye la saturación absoluta. La Ley de Henry indica que a temperatura constante, la cantidad de gas disuelto en un determinado volumen de líquido es proporcional a la presión que ejerce el gas:  $c = K \times p$

En la columna de agua la presión real en atmósferas a una profundidad dada  $P_z$ , es igual a la presión existente en superficie  $P_o$ , más 0,0967 veces la profundidad  $z$  en metros.

$$P_z = P_o + 0,0967 z$$

T °C	O <sub>2</sub> mg/l						
0	14,6	8	11,47	16	9,56	24	8,25
1	13,77	9	11,9	17	9,37	25	8,11
2	13,4	10	10,92	18	9,18	26	7,99
3	13,05	11	10,67	19	9,01	27	7,86
4	12,70	12	10,43	20	8,84	29	7,64
5	12,37	13	10,2	21	8,68	29	7,64
6	12,06	14	9,98	22	8,53	30	7,53
7	11,76	15	9,76	23	8,38	31	7,42

**Tabla 1.** relación de la solubilidad en agua pura a 760 mm de presión con respecto a la temperatura.

La saturación se cuantifica, sobre la base del equilibrio en los límites entre la superficie del agua y la atmósfera, siendo la solubilidad el cociente entre la concentración en la solución y la concentración arriba de la solución. Aún, cuando los gases se encuentran en niveles sub-superficiales, se hace referencia a la temperatura a esa profundidad y a la presión atmosférica sobre la superficie, ignorando los efectos de la presión hidrostática.

## METODOLOGÍA

Se tomó como referencia, en un breve estudio descriptivo, el desarrollo de más de 600 perfiles de Oxígeno disuelto Vs. Temperatura con la revisión y análisis de los datos, desde mayo/ 1994, hasta abril/ 2006. Los mismos fueron desarrollados para seis estaciones (Fig. 1) y en los sub-embalses laterales los arroyos Ao Aguapey y Ao Yacarey. La temperatura del agua y el oxígeno disuelto, se midió cada metro desde la sub-superficial a 0,50 m, hasta el fondo a 0,50 m antes del sedimento. Las mediciones fueron efectuadas a tiempo reales desde embarcación, utilizando sensores de inmersión, de la marca WTW Oxi 197 y Orión 840 de procedencia USA, con compensador de presión y corrector de salinidad, fijado a valor cero correspondiente a agua dulce. La profundidad máxima de veinte metros, se da en la estación Boya, aguas arriba del Vertedero Principal. En el centro Jesuitas, en Pto. Valle y en Sto. Tomás, se efectuaron mediciones hasta doce y catorce metros de profundidad, en Ombú y San Cosme hasta los ocho metros de profundidad.

Los datos, fueron volcados en una matriz Excel, donde se correlacionan con la profundidad, la presión y la densidad del agua con la temperatura y el oxígeno disuelto (mg/l) convertido a (%) de saturación absoluta y relativa. Los valores obtenidos en la correlación se grafican confrontando temperatura y densidad, el oxígeno disuelto (mg/l) con el % de saturación absoluta y % de saturación relativa, correlacionando el oxígeno disuelto medido con el determinado a partir de la saturación para la presión a distintas profundidades, y gráficos de evolución espacial/ temporal de temperatura del agua Vs. oxígeno disuelto.

## RESULTADOS

### *I. Periodo 94/95. Inmediato al cierre*

En el momento del cierre se tiene una intensa remoción de materia orgánica de los valles de inundación debido a la formación del embalse. En la estación Canal de los Jesuitas, centro del lago en el mes de Octubre '94 se vio una deflexión en oxígeno de 0,9 mgO<sub>2</sub>/l hasta los 5 mts, incrementándose posteriormente con la profundidad. La variación de temperatura en la columna fue de 2,1 °C con disminución en profundidad. En enero y febrero '95 se dieron casos de incrementos en oxígeno entre 0,8 y 0,9 mgO<sub>2</sub>/l, con disminuciones pequeñas de temperatura de 0,1 °C por estratos o filetes, de algunos metros de espesor. La estación ubicada frente a San Cosme, sobre el ex brazo Añá Cuá, fue la de menor variación en la transecta, caracterizándose por presentar frecuentemente una vertical en los perfiles térmicos y del oxígeno disuelto. En caso de variación, el oxígeno aumenta desde la superficie y la temperatura con disminución en filetes de algunos metros de espesor, con variaciones entre sí 0,1°C. La estación ubicada sobre el ex brazo Añá Cuá monte Sto. Tomás, mostró deflexión en oxígeno en las campañas de octubre a diciembre '94, con marcada tendencia a estabilizarse en sus valores, a partir de la campaña de enero '95. En cambio, el perfil de temperatura acusó siempre o una vertical sin variación a lo largo de la columna de agua, o descenso en décimas hacia la profundidad. Una única variación importante en oxígeno disuelto, se tuvo en el mes de octubre '94, cuando desde 7,2 bajó hasta 3,8 dando una diferencia de 3,4 mg/l, entre el valor de superficie y el de profundidad. En la estación ubicada inmediatamente aguas arriba del Vertedero Principal (boya), la mas profunda el perfil de temperatura generalmente resultó isotérmico, o bien con enfriamiento de décimas en los primeros 2-3 mts.

### *II. Periodo 96/97*

Con estabilidad en el desarrollo de los perfiles y pocos cambios tanto de temperatura como de oxígeno disuelto. La mayor de las veces, la temperatura permanece casi constante desde la superficie

misma, o decrece unas décimas en la columna en los primeros metros. En cambio, el oxígeno disuelto generalmente aumenta con la profundidad entre 0,5-0,8 mg/l, en los primeros cinco metros, permaneciendo desde allí ambos estables.

Pto. Valle, lugar de aguas quietas, en la generalidad de las campañas la temperatura presentó valor constante. El oxígeno disuelto con pequeñas deflexiones, de hasta 0,5 mg/l y a partir agosto '96, empieza a generarse aumentos de oxígeno disuelto con la profundidad, hasta un máximo de 1 mg/l. El año '97, con características similares, y con gran tendencia al aumento del oxígeno disuelto con la profundidad en décimas, acompañado de disminución de temperatura hasta 2,8 °C.

En el Canal de los Jesuitas la temperatura es estable en todo el perfil, o con pequeño enfriamiento en los primeros metros, para luego descender ó con un mismo valor hasta el fondo ó escalonadamente en décimas, por filetes de dos o tres metros, hasta una diferencia máxima de 1,7 °C. El oxígeno sin mayor variación, o con pequeña disminución en los primeros metros de 0,1-0,2 mg/l y luego con valor constante a lo largo del perfil. A partir de Agosto/96, se nota un aumento del oxígeno con la profundidad, con un máximo de 1,2 mg/l; la temperatura con decrecimiento por filetes,

San Cosme con perfiles térmicos y O. D. estables con pocas deflexiones en el oxígeno disuelto. En la campaña de agosto '97, se produce la máxima diferencia de O. D. 1,3 mg/l, la temperatura tan solo 0,2 °C medido hasta los nueve metros de profundidad. A partir de septiembre '96, se tiene permanentemente incrementos en décimas del oxígeno disuelto, o con un mismo valor desde la superficie hasta el fondo, que continúa todo el año 1997, mientras la temperatura ó es una vertical ó decrece con la profundidad.

En Santo Tomás el comportamiento es con predominio de aumento del oxígeno disuelto y disminución de la temperatura con la profundidad en algunas décimas o estable hasta el fondo. A partir de julio '96 y el año '97, se mantienen estas formas de perfil.

En la Boya aguas la más profunda con 20 metros,

muy estable la temperatura y el oxígeno disuelto. La temperatura con un mismo valor desde la superficie o con leve descenso en alguna décima en los primeros metros para luego permanecer constante, o con enfriamiento por capas o filetes con diferencias de 0,1°C entre ellas y el oxígeno disuelto con pequeñas deflexiones hasta 0,5 mg/l. A partir de Julio/96, tendencia a aumentar con la profundidad

### III. Sub-embalse Ao Yacarey Ao Aguapey

El sub-embalse Yacarey con una profundidad de 5mt, mostró en varias ocasiones deflexión de oxígeno disuelto, otras corresponden a una vertical o con pequeños incrementos. La temperatura, en general con disminución en los primeros metros, para luego descender con valor constante. En el mes de enero '97 se observó gran descenso en los valores de superficie y fondo desde 32,2 a 26,7 °C y desde 8,4 a 0,6 mg/l el O. D (Fig. 1).

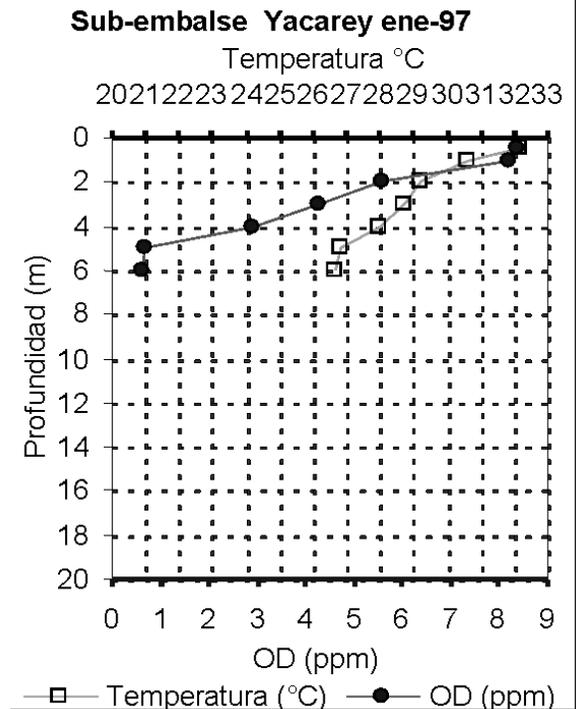


Fig. 1. Sub-embalse Ao Yacarey: perfiles de oxígeno disuelto vs temperatura en enero 1997.

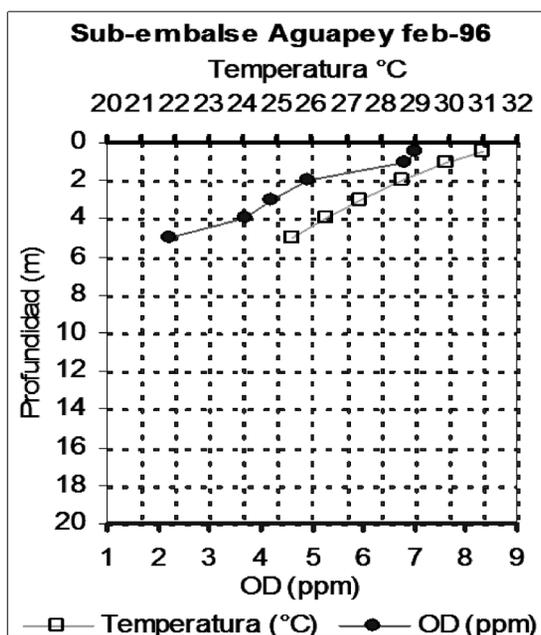


Fig. 2. Ao Aguapey: perfiles de oxígeno disuelto vs temperatura, mes febrero de 1996.

El Sub-embalse Ao Aguapey con profundidad de 7 mt, mostró deflexión en los valores de oxígeno en los meses más calurosos. En algunas campañas, con gradual disminución del O.D. por filetes de uno a dos metros de espesor, con diferencias de 0,1 mg/l entre si y la temperatura con similar comportamiento. En la Fig. 2 se muestra el Ao Aguapey en el mes febrero de 1996, máximo en deflexión de oxígeno disuelto, valor de superficie 7,0 mg/l hasta 2,2 mg/l con cinco metros de profundidad con la temperatura en gradual disminución unos 5,6 °C. Esta situación es rápidamente revertida para la siguiente campaña hacia una mejor forma.

Nuevamente, en noviembre '97 (Fig. 3) se dio una deflexión de oxígeno disuelto, desde 7,1 mg/l hasta 3,3 mg/l en siete metros de profundidad con disminución brusca de temperatura desde 26,9 a 23,7 °C, aproximadamente 1°C por metro, retornando a una mejor forma inmediatamente en la siguiente campaña. A estos meses les sigue un periodo de estabilización, con incrementos del valor de O. D., o como una vertical hasta el fondo.

IV. Periodo 98/99

La estación Pto. Valle con varios meses de incrementos en los valores de oxígeno alternando con algunos de deflexión, o con una pequeña disminución del oxígeno con la profundidad, mientras la temperatura se mantiene casi con el mismo valor a lo largo de la columna. En diciembre '98, se tiene un aumento de O. D. de 1,7 mg/l, con descenso de 3,1 °C temperatura en los cuatro primeros metros.

Las demás estaciones presentan estabilidad aún mayor, con temperaturas Isotérmicas y en algunos casos, con disminución en profundidad de 0,1-0,2 °C. El oxígeno generalmente con valor constante o con incrementos menores a 1 mg/l. Fig.4 muestra los perfiles de invierno y verano año '99 en Jesuitas en el centro del lago, medidos hasta 9 mts.

V. Periodo 00/01/02

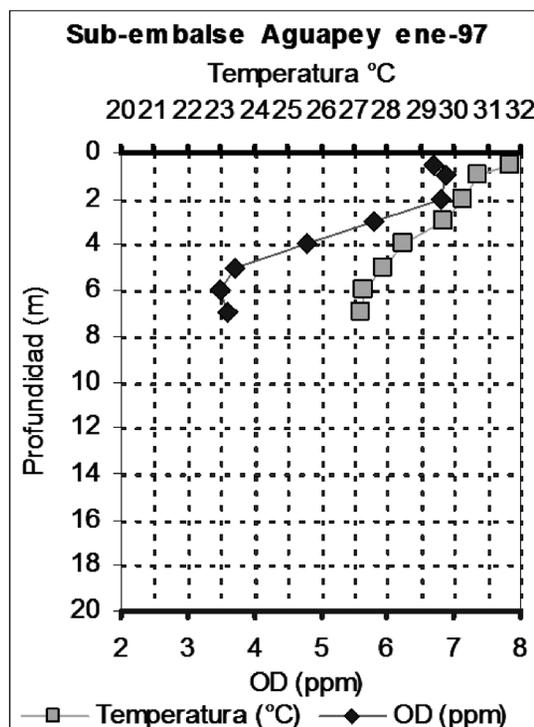


Fig. 3. Ao Aguapey: perfiles de oxígeno disuelto vs temperatura, mes enero de 1997.

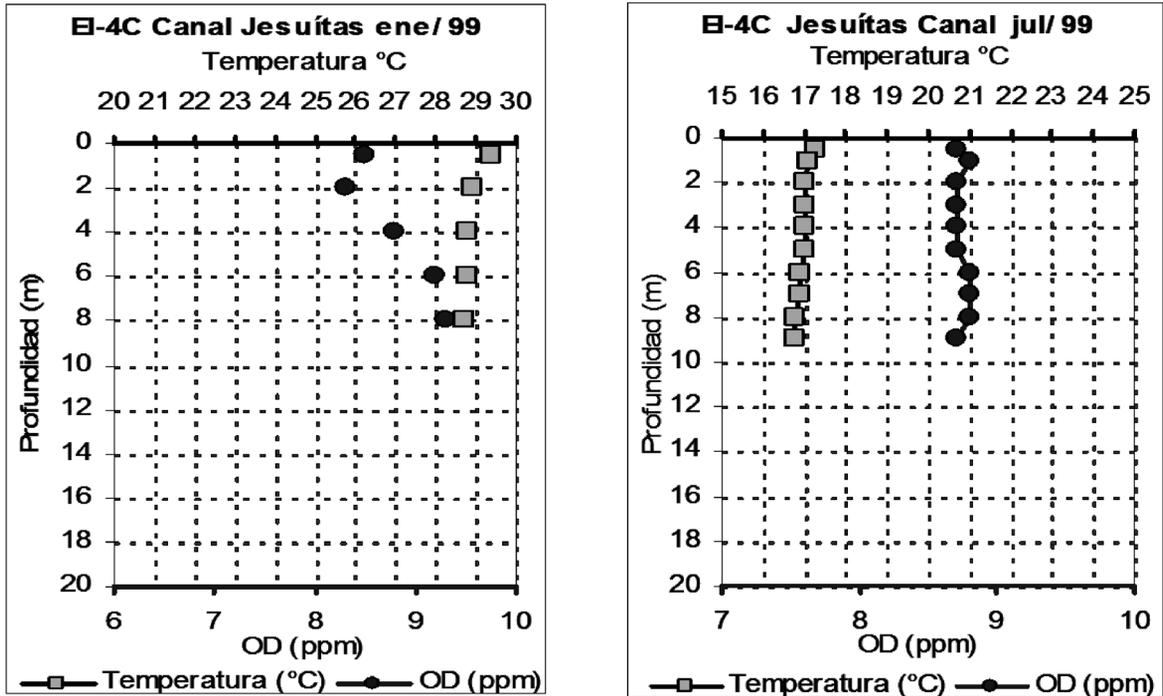


Fig. 4. Canal Jesuítas: perfiles de oxígeno disuelto vs temperatura, meses de enero y julio de 1999.

Pto. Valle, es la estación con mayor ocurrencia de perfiles con leve deflexión del oxígeno disuelto con la profundidad, que se da escalonadamente a lo largo del perfil. Las temperaturas también decrecieron levemente con la profundidad, tomadas generalmente hasta los diez o doce metros y en el año 2002, el comportamiento fue aún más estable.

En el centro Canal de los Jesuitas como, ambas variables se presentan muy estables, con valores constantes a lo largo del perfil. La máxima variación de temperatura entre superficie y fondo fue de 2 °C en el mes de octubre '01. En diciembre '01, se tuvo la máxima deflexión en oxígeno 1,3 mg/l.

San Cosme, se caracteriza por mantener un perfil con temperatura constante y oxígeno sin variación con la profundidad. En las mediciones de noviembre '01, se observó la máxima diferencia de temperatura en el perfil 0,9 °C hasta los siete metros de profundidad y el oxígeno disuelto mostró una pequeña disminución de 0,1 mg/l, desde la superficie hasta los siete metros. Al siguiente mes, diciembre '01, se llegó a una situación de decreci-

miento de la temperatura, la más significativa del periodo 2,2 °C en siete metros de medición y el oxígeno disuelto también con una máxima disminución del periodo 1,7 mg/l

En la Boya, la temperatura con pequeña disminución en los primeros cuatro metros y luego con valor constante. El oxígeno con descenso progresivo por filetes de espesor variable, de cuatro a seis metros o con valor constante hasta los dieciocho metros de profundidad

Las Figs. 5 y 6 muestran los perfiles de verano '01 e invierno '02 en la estación Jesuitas y Pto. Valle

#### VI. Periodo 03/ 04/ 05/ 06

Pto. Valle es la estación con más recurrencia de perfiles con disminución de la temperatura con la profundidad con valores 3,8 °C y 3,3 °C en octubre y diciembre '03 El oxígeno disuelto, con muy poca variación, decreciendo unas décimas, o permaneciendo constante con la profundidad. En el mes de diciembre '04, se tuvo la máxima del período con una diferencia de 3 °C medidos en trece metros.

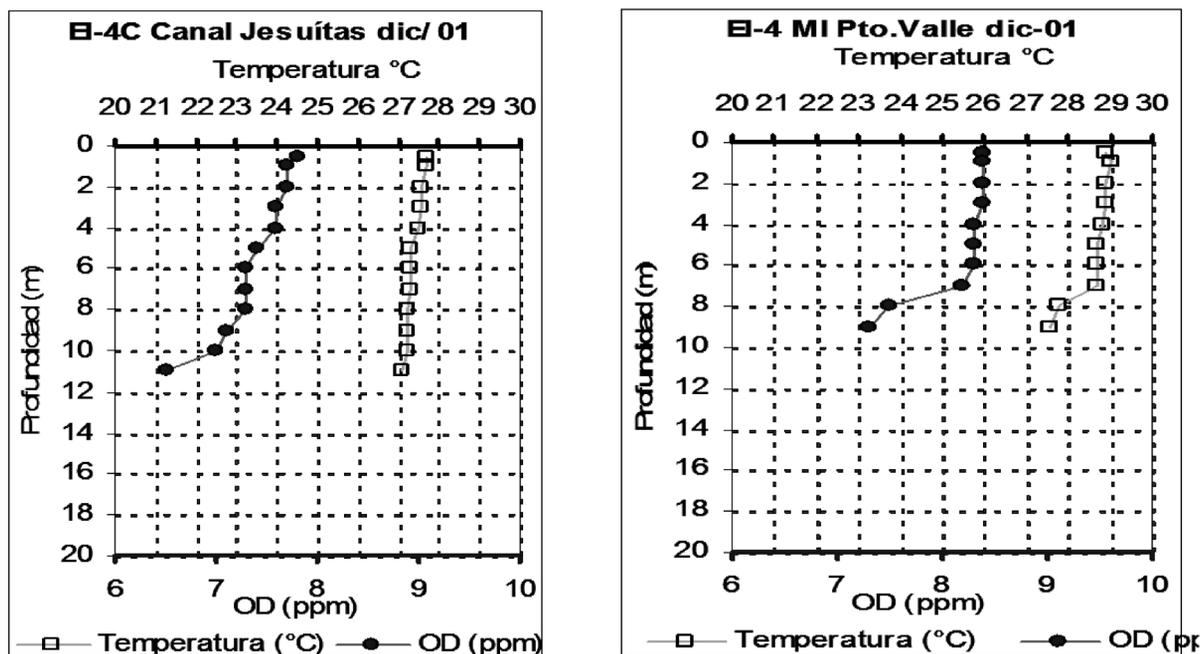


Fig. 5. Canal Jesuítas y Puerto Valle: perfiles de oxígeno disuelto vs temperatura, mes de diciembre de 2001.

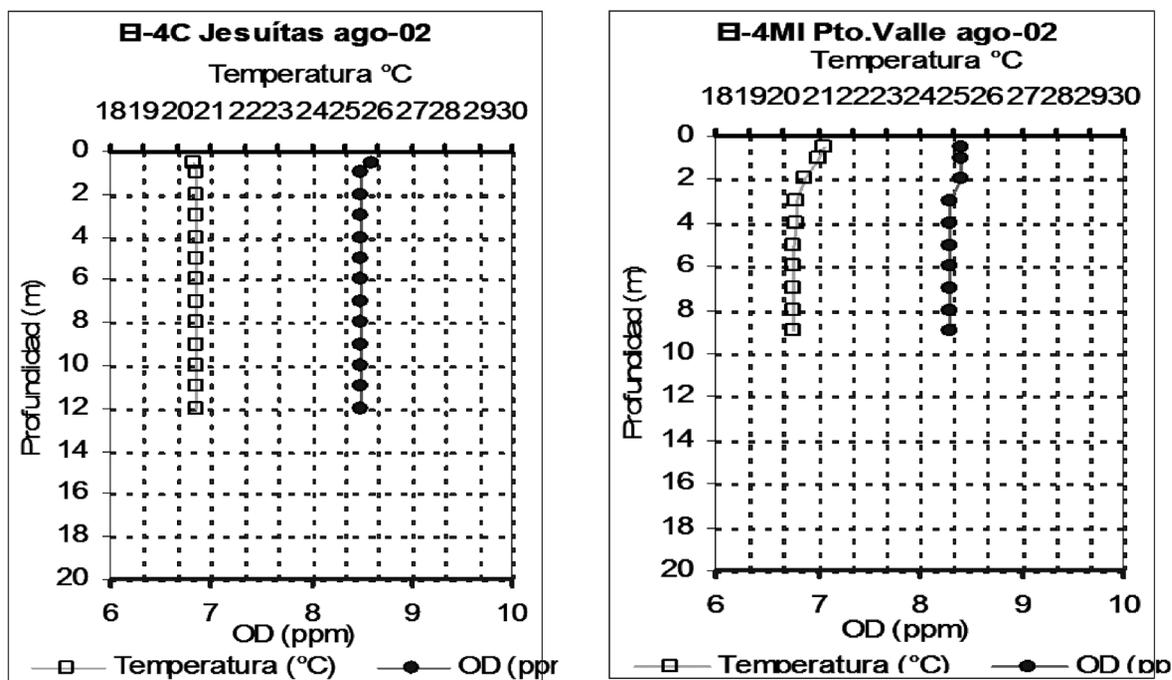


Fig. 6. Canal Jesuítas y Puerto Valle: perfiles de oxígeno disuelto vs temperatura, mes de agosto de 2002.

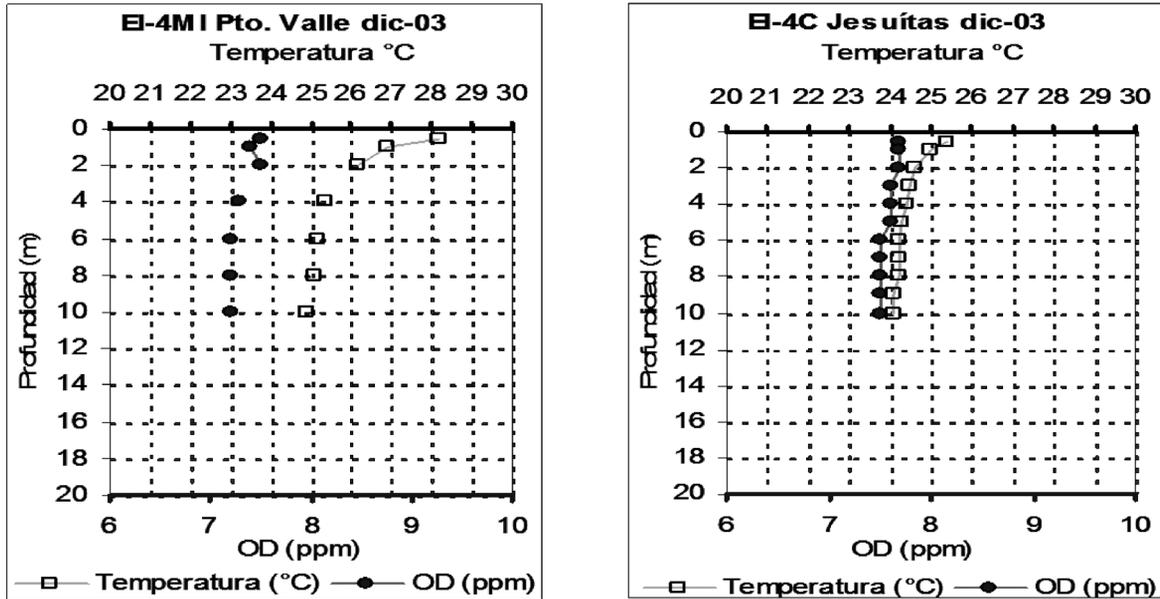


Fig. 7. Puerto Valle y Canal Jesuítas: perfiles de oxígeno disuelto vs temperatura, mes de diciembre de 2003.

El Canal de los Jesuítas, con temperatura muy estable con predominio de curvas Isotérmicas y en algunas campañas con descenso con la profundidad en el orden de 0,2 - 0,6 °C. El oxígeno disuelto con muy poca variación, decreciendo unas décimas de 0,2 a 0,7 mg/l, o permaneciendo constante. Excepcionalmente en el mes de Octubre '03, llegó hasta los once metros de medición, con la máxima deflexión, 1,4 mg/l O.D. La temperatura decreció en total 2 °C. La Fig. 7 muestra los perfiles en Pto. Valle y Jesuítas en diciembre '03

Las Figs. 8 y 9 muestran los niveles en Pto. Valle y Jesuítas en julio y diciembre de 2004, meses verano e invierno. La Fig. 10 muestra temperatura y O.D. en Pto. Valle y Jesuítas julio de 2005.

En el sub-embalse Aguapey (Fig. 11) en las mediciones del mes de diciembre de 2004, se observó el abatimiento del oxígeno disuelto desde 7,9 mg/l en el nivel sub-superficial, hasta 0,4 mg/l y el perfil de temperatura con disminución de 3,2 °C desde 29,2 °C hasta 26,0 °C

La Fig. 12 ilustra el desarrollo del perfil en enero '06 en Jesuítas y Valle

## CONCLUSIÓN

Entre los años 1994-1995, con la remoción de materia orgánica, y procesos de oxidación-estabilización, es más notorio el consumo de oxígeno en los estratos inferiores, que nunca fue muy grande ni persistente y a un periodo corto de consumo de oxígeno le sucede otro con forma más estable. En los Ao Yacarey y Ao Aguapey, se dieron deflexiones más intensas de oxígeno, produciéndose la pronta reposición hacia valores más favorables. La temperatura en cambio con características de estabilidad con valor constante en la columna, o con leve decrecimiento en la profundidad.

En las campañas de los años 1998-1999, se ve una estabilidad aún mayor, con incrementos de oxígeno con la profundidad entre 0,5-1,0 mg/l, la que se verifica en los primeros metros y luego permanece constante hasta el fondo y frecuentemente los perfiles con características bien definidas, con pocos cambios. Los casos de deflexión de O.D. son mínimos retornando rápidamente hacia condiciones más favorables. La temperatura muchas veces es Isotérmico y otras veces al decrecer unas décimas en la columna, lo hace en los primeros metros, para luego permanecer con un mismo valor hasta el fondo.

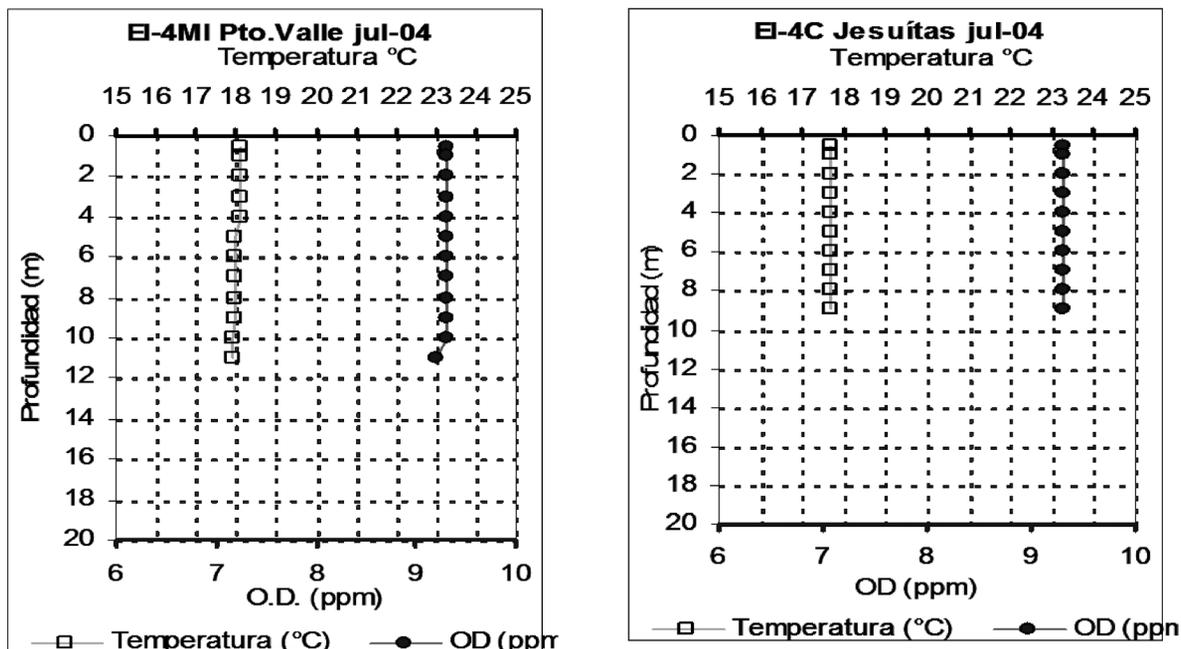


Fig. 8. Puerto Valle y Canal Jesuítas: perfiles de oxígeno disuelto vs temperatura, mes de julio de 2004.

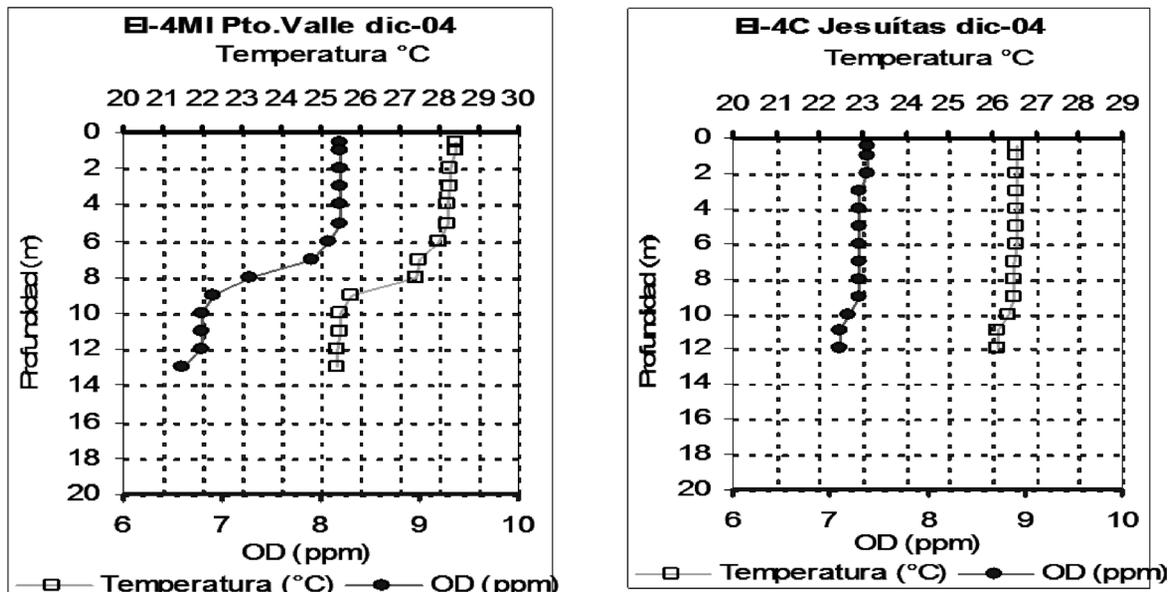


Fig. 9. Puerto Valle y Canal Jesuítas: perfiles de oxígeno disuelto vs temperatura, mes de diciembre de 2004.

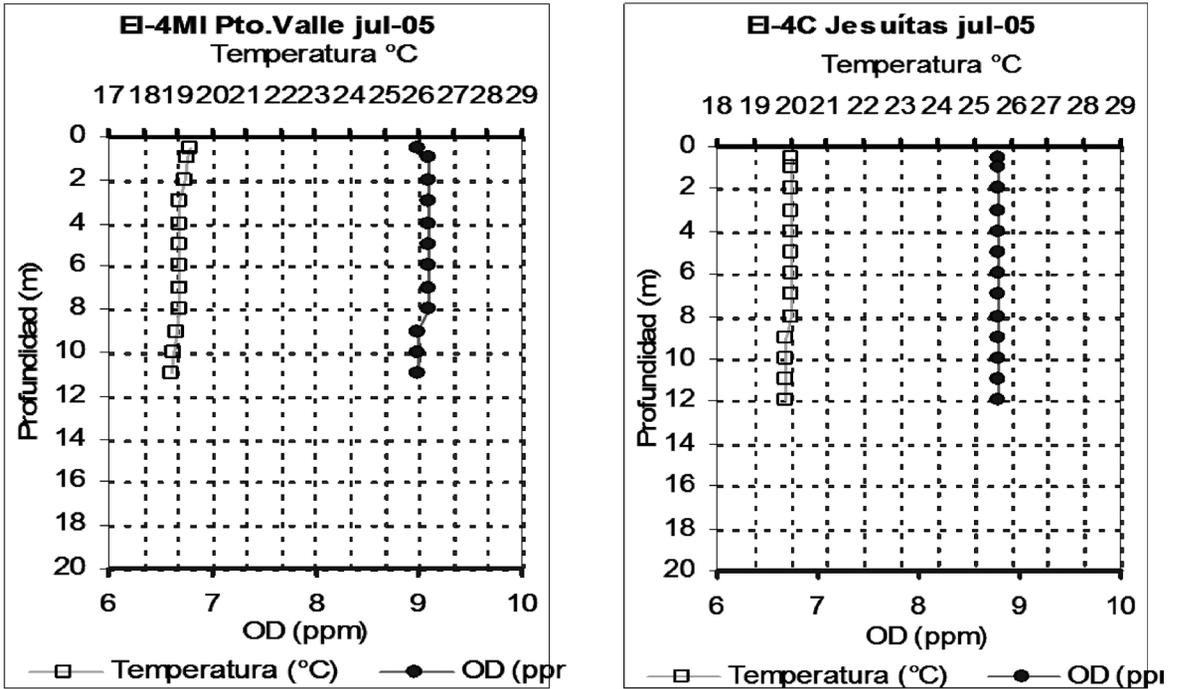


Fig. 10. Puerto Valle y Canal Jesuítas: perfiles de oxígeno disuelto vs temperatura, mes de julio de 2005.

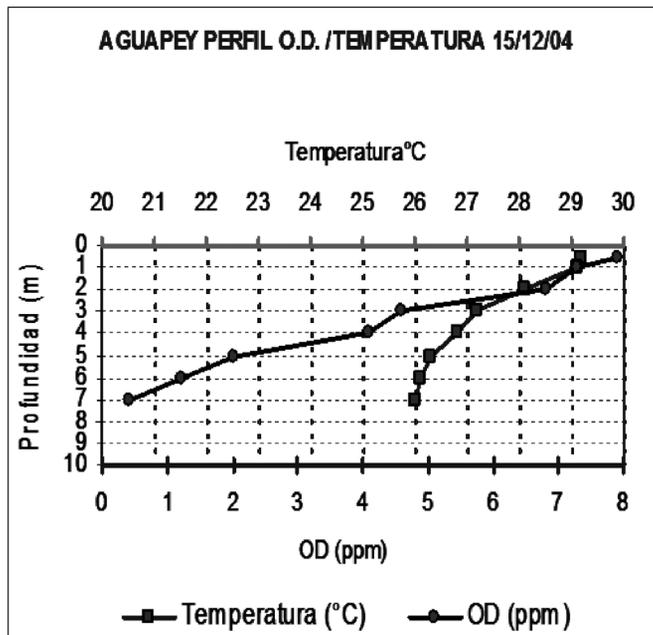


Fig. 11. Arroyo Aguapey: perfiles de oxígeno disuelto vs temperatura, diciembre de 2004.

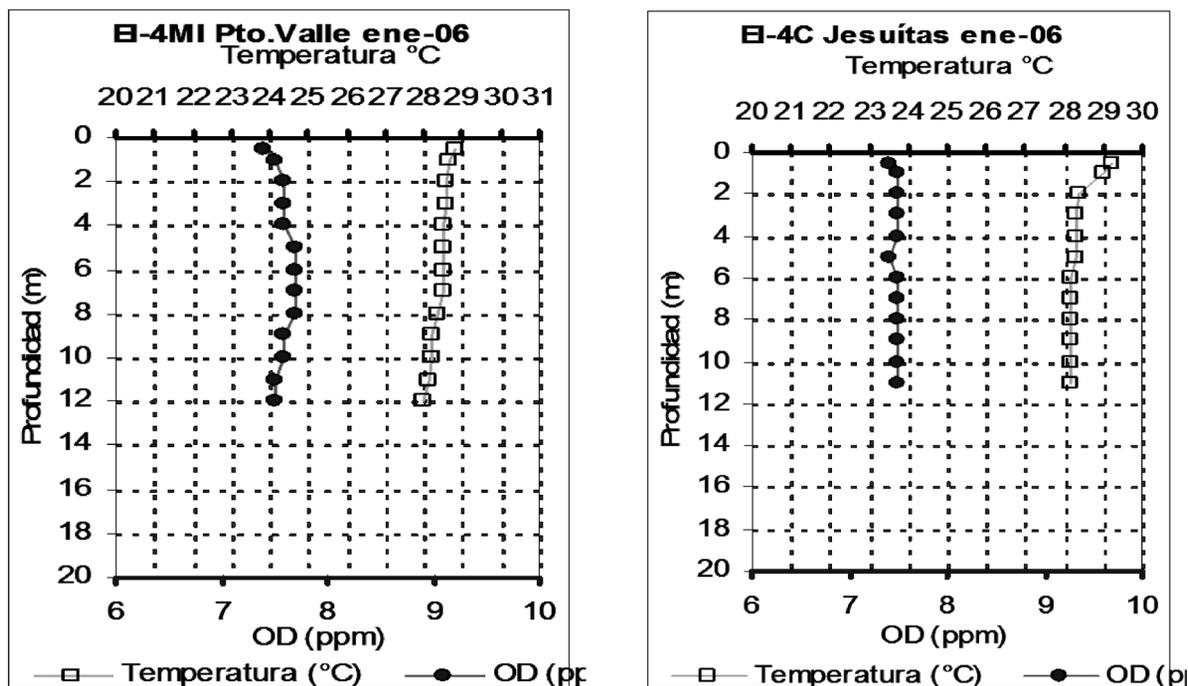


Fig. 12. Puerto Valle y Canal Jesuitas: perfiles de oxígeno disuelto vs temperatura, mes de enero de 2006.

En los años 2000-2003, con recurrencia de los mismos tipos de perfiles pero aumentando aquellos con pequeños incrementos con la profundidad. Se dan también casos de deflexión de oxígeno, aunque mínimos, de 0,2 a 1,0 mg/l. La temperatura permanece estable visualizándose decrecimiento máximo de la temperatura con la profundidad, 2,9 °C en Sto. Tomás y 2,2 °C en San Cosme

En los años 2004 a abril 2006, con situaciones muy similares que se repiten sostenidamente. En los meses de verano, generalmente aumenta la temperatura media en la columna y el calentamiento de la superficie por la incidencia solar directa, produciéndose el enfriamiento inmediato, en las capas mas profundas. La estación Pto. Valle, es la que recurrentemente presentó el mayor gradiente termal, como también la máxima temperatura media de la columna, generalmente en los meses calurosos. En el mes octubre 2003, la diferencia fue de 3,8 °C y en diciembre fue de 3,3 °C. En diciembre '04 en Pto. Valle, se tuvo la máxima diferencia termal, 3 °C, repitiéndose esa característica con periodicidad

anual. La máxima disminución se dio en el mes de diciembre '05 con 4,5 °C. En el centro del lago la estación Canal Jesuitas, el desarrollo del perfil fue más estable con menos variación, máximo 1,5 °C en catorce metros de profundidad, siendo isotérmico la mayor de las veces. Desde diciembre '05 hasta abril '06 en que concluye el tiempo en que se estuvo operando a cota 76 msnm, se repiten sostenidamente estas formas. El calentamiento por radiación solar domina en las estaciones más cálidas, enfriándose las aguas con los cambios meteorológicos, proporcionando el viento la energía que distribuye el calor, causando oleajes que generan mezclas y corrientes proporcionales a su intensidad con lo cual se rompe cualquier débil estratificación, con rápida respuesta hacia la producción de una mejor forma. Tampoco se ha detectado diferencia de densidad en los estratos ni se ha evidenciado diferencia sustancial en el gradiente termal, que sugiera la formación de termoclina.

#### AGRADECIMIENTO

tá, por la autorización concedida para la utilización de los datos recabados a cota 76 msnm, a través de los distintos Convenios de Calidad de agua, para su publicación y divulgación, en el ámbito Científico y Académico de la Universidad Nacional de Asunción.

### **BIBLIOGRAFÍA**

COLE, G. A. 1983. Manual de Limnología. 3<sup>a</sup>

Edición -1988. Hemisferio Sur S.A. 405p.  
MARGALEF, R. 1983. Limnología. Ediciones Omega. 870p.  
ODUM, E.P. 1987. Ecología. 3a Edición. Nueva Editorial Interamericana S.A. 639p.  
WETZEL, R. G. 1981. Limnología. Ediciones Omega. 679 p.