

CONTRIBUCION AL ESTUDIO DE LOS PROCESOS ESTUARIALES EN LAS DESEMBOCADURAS DE LOS RIOS RAPEL Y MAIPO

por JOSÉ F. ARAYA VERGARA
Departamento de Geografía de la Universidad de Chile

1. ABSTRACT

CONTRIBUTION TO THE STUDY OF ESTUARINE PROCESSES AT THE MOUTHS OF THE RIVERS RAPEL AND MAIPO

Two surveys to investigate the main physical problems derived from the water movements, the mixing processes, and the distribution of salinity and density, were made in the estuarine environments of the Rapel and Maipo rivers (Chile, 33° 55' and 33° 37' S.). Both bodies of water belong to rivers which drain coastal plain landscapes, but the valley bottoms are not completely covered by the bodies of water. The waters of the Rapel are clear, while those of the Maipo are turbid. The sampling for the Rapel was made in flood of syzygy and for the Maipo, in flood of quadrature, but both cases show sufficient tidal ranges as to suffer tidal influence.

RESULTS

1) The Rapel, with clear waters, presents a marked stratification in depth, with fresh waters and oligohalines above and polihalines to mesohalines below (sea waters). The Maipo lacks this stratification (fresh waters to oligohalines).

2) The position of isopycnal surfaces (σ_t) with respect to water types shows for the Rapel a seaward moderate gradient and an upstream salt wedge, with interface. For the Maipo there is homogeneity and low ranges of σ_t , without marked two layer flow.

3) The mixing processes are vertical for the Rapel and lateral for the Maipo.

4) A situation as that shown on the figures changes with the river flow and

tidal variations, which displace the isopycnal, isohaline and isothermal surfaces.

5) The combination of the estuarine types salt-wedge and two layer flow with vertical mixing from H. STOMMEL is applied to the Rapel; and the vertically homogeneous type, to the Maipo.

6) Both estuarine environments are influenced by man's impact on the landscape, specially by the construction of a mill-dam for hydroelectric energy. These factors change the fluvial regime, and the most important periodic phenomenon is the tide.

7) This situation affects the ecological conditions as evidenced by the interface of the Rapel and the turbidity of the Maipo.

2. ANTECEDENTES Y METODOS

Fuera de los estudios hechos en las desembocaduras del Maule y del Valdivia, es muy poco lo que se sabe acerca de los mecanismos de las desembocaduras de los ríos chilenos. Más aun, en los casos citados, no se ha tocado el comportamiento hidrológico de desembocadura con muestreos sistemáticos. La integración de este tipo de trabajo en las investigaciones litorales que se realizan en el Grupo de Trabajos de Geografía Física del Departamento de Geografía, puede contribuir en parte a iluminar el pensamiento acerca de las reacciones geográficas promovidas por los ríos al desembocar en el mar.

Como los ríos Rapel y Maipo afectan incuestionablemente a las características litorales de la costa de Santiago, se han hecho muestreos preliminares con el fin de descifrar el papel que aquí cumplen los fenómenos estuariales.

Trabajo de campo

Se hicieron dos campañas: una entre los días 10 y 12 de octubre al Rapel (1969) y otra el 16 de enero al Maipo (1970), trabajándose sobre la base de cortes hidrológicos de 1,5 a 2 kilómetros de largo, a partir de un poco más adentro de la boca. Esto se realizó en embarcaciones corrientes de uso local y las estaciones fueron fijadas con rumbos magnéticos. En el Rapel se usaron cuatro estaciones y en el Maipo cinco, separadas por distancias que fluctuaron entre 500 y 200 metros. En el Rapel se siguió la línea media, pero en el Maipo, debido a la escasa profundidad, la parte más profunda.

Dada la poca profundidad de los cuerpos de agua se usó cuerda corriente y una botella tomamuestras de apertura remota. La profundidad fue medida por sondaje directo y la sonda determinó el alcance de los lances para muestra en cada estación. En el Rapel, con profundidades hasta de 6 m., se extrajeron botellas de tres niveles: superficial, medio y de fondo. En el Maipo, más bajo, las botellas provinieron de dos niveles: superficial y de fondo.

La temperatura fue tomada a bordo con termómetro de superficie y con la precisión de 0,1°C, suficiente para este tipo de trabajos. Para el caso especial

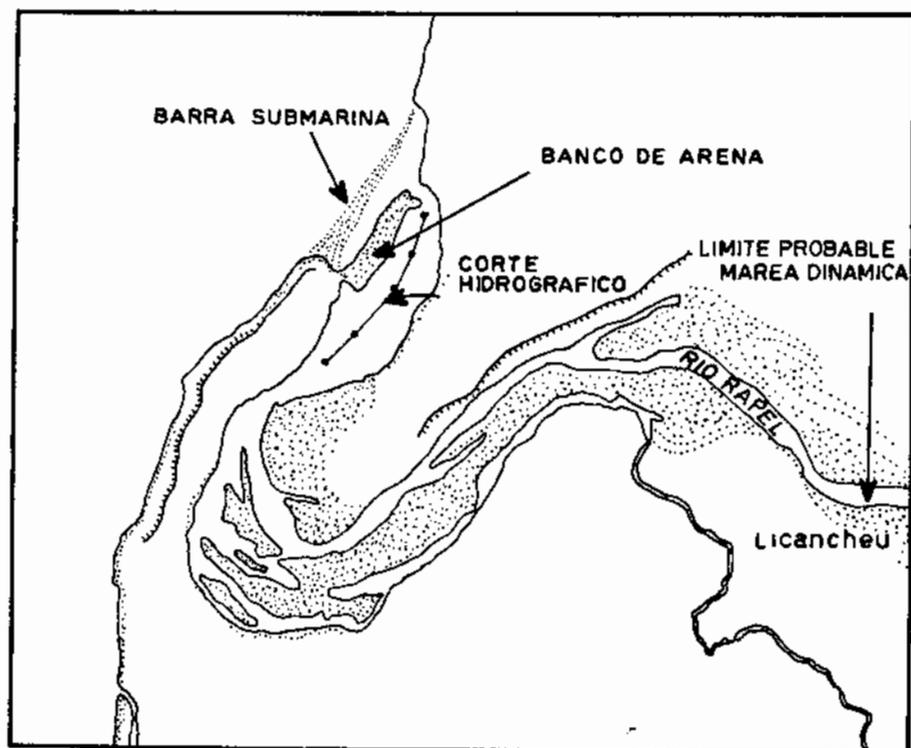


Fig. 1a.

Croquis del ambiente estuarial del Rapel

del Maipo se hicieron mediciones colorimétricas de pH, porque se advirtió mayor homogeneidad en las aguas. A bordo también se midió la transparencia con el disco de Secchi para evaluar de una manera general la turbidez.

El muestreo se hizo en flujo de sicigias en el Rapel y en flujo de cuadraturas en el Maipo, constatándose en el primer caso amplitud de más o menos 1,40 m. y en el segundo, de 60 cm. a 1 m.

Trabajo de laboratorio y gabinete La determinación de la salinidad se hizo en laboratorio con la gentil colaboración del Departamento de Oceanografía del Instituto de Fomento Pesquero. Se usó el método eléctrico de inducción, muy preciso para estos fines (Salinómetro "Auto-lab" M. K. III) y sobradamente confiable para cualquiera investigación. Su efectividad para estudios de estuarios la corroboran las experiencias de K. E. SCHEMER y D. W. PRITCHARD (1961, en P. L. MANGELSDORF, 1967). El "Auto-lab" da una precisión de 0,001‰, con dos decimales confiables para salinidades bajas (aguas oligohalinas).

Los cálculos de la densidad fueron hechos con el fin de expresar esta variable en valores de sigma-t (σ_t), llegándose a la expresión con temperatura *in situ*, a partir de la densidad a 0° (σ_0) y de la búsqueda de la profundidad dinámica (D) tal como lo expone M. KNUDSEN (1901). Sumariamente:

$$\sigma_0 = \sigma_t + D \text{ ó } \sigma_0 = -0,1324 + \frac{\sigma_t - \Sigma_t}{1 \cdot At + Bt (D + \sigma_t - 0,13)}$$

Seg. Thiessen (Knudsen) Σ_t = densidad agua destilada a t° con relac. a 4°
At y Bt = constantes de la temperatura.

El trazado de las curvas σ_t requirió de unos 280 cálculos, para abarcar las posibilidades de distribución de los tipos de agua. Estas curvas aparecen demasiado verticales en comparación con las que se acostumbra a ver en relaciones oceánicas, debido a la gran dispersión de salinidad que muestran los resultados del análisis frente a las relativamente moderadas diferencias de temperatura. (Fig. 4).

3. AMBIENTE FISICO Y FACTORES

Desde el punto de vista morfológico, las condiciones de desembocadura son notoriamente diferentes entre los sectores correspondientes de los ríos Maipo y Rapel, a pesar de algunos rasgos comunes (Fig. 1).

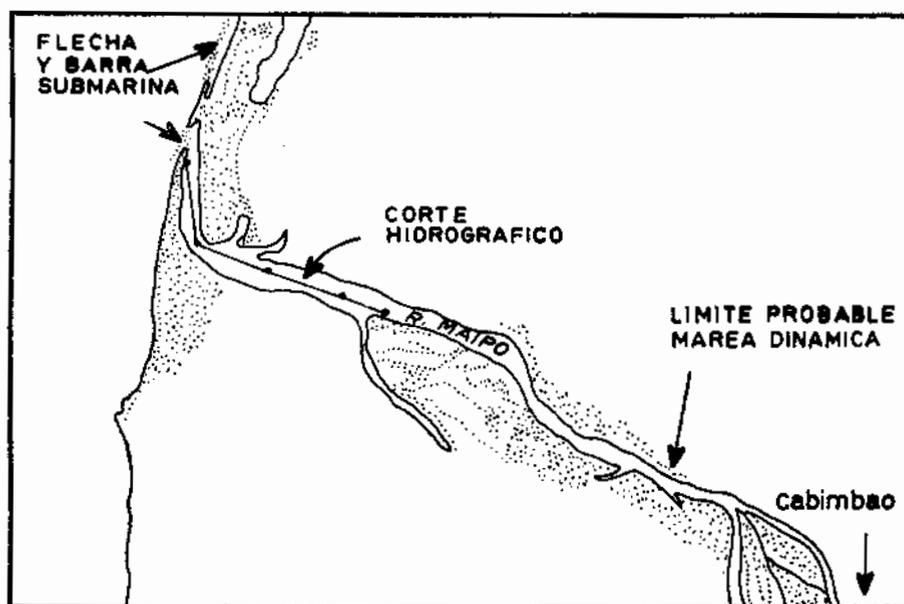


Fig. 1b.

Croquis del ambiente estuarial del Maipo

Rapel

En su curso inferior, este río escurre por un valle inscrito en las planicies litorales, que lo enmarcan e individualizan con una anchura aproximada de 1 a 1,5 km. entre las bermas. La superficie de las plataformas disectadas está comúnmente sobre los 100 metros de altura. Desde unos 8 kilómetros a partir del mar, medidos por el thalweg principal, el río tiene un cauce unificado de 100 a 150 m. de ancho, que se anastomosa hasta llegar a la curvatura principal hacia el NNE, nuevamente en cauce unificado, pero muy ancho: 250 a 500 m. Este cauce se desarrolla sobre un lecho pedregoso, arenoso y fangoso, según las condiciones. El anastomosamiento, antes de la parte más importante del estuario, está integrado por bancos de estos materiales. El obstáculo que desvía al cuerpo de agua hacia el NNE es un resto de la terraza, cuyo cuerpo está constituido por sedimentos terciarios. La parte más importante del cuerpo de agua, la inferior, con poco más de 2 km. de largo, llega hasta la desembocadura misma, que es angosta (no más de 100 m.). Un banco de arena y rodados en forma de barra es el responsable de esta estrechez, que acusa nitidamente la separación con el mar abierto. La barrera tiene un largo de unos 750 m. y, de no existir, la desembocadura tendría unos 800 m. de ancho. Hacia el mar, y en forma submarina, existe una barra causada por la deriva litoral (Fig. 1a) que queda de manifiesto en el alineamiento de las rompientes. La pendiente del eje hidráulico en el sector de interés es bastante inferior al grado (menos de 10'), lo que da una noción de la capacidad de penetración de la onda de marea.

Desde el punto de vista del régimen, se puede decir que, antes de la construcción de la Central Rapel, el gasto medio del río cerca de la desembocadura era de 161 m³/seg., con máxima en julio (280) y mínima en febrero (56) (H. FUENZALIDA, 1965). Estas condiciones han variado notoriamente con el funcionamiento de la central, que da distribuciones más caprichosas en esta parte, de tal manera que las variaciones periódicas de altura del eje hidráulico están solamente condicionadas por el ritmo de las mareas, siendo el gasto fluvial un factor difícil de generalizar.

Maipo

En su curso inferior hay un notorio encajonamiento del río, cuyo valle también resulta de la disección de planicies litorales. La distancia entre las bermas es escasa y difícilmente llega al kilómetro. Como en el caso anterior, las plataformas de las planicies también sobrepasan los 100 metros de altura. Hacia la desembocadura el valle se ensancha y la distancia entre las bermas alcanza unos 2 km., desarrollándose un notorio fondo plano, con dirección más o menos recta hacia el NW y hasta la desembocadura misma, a partir del codo de Cabimbao

(Fig. 1b). Sobre un lecho de arenas y rodados, el cauce tiene numerosas difluencias y anas omosamientos y sólo se unifica unos 2 km. antes de llegar al mar, en la localidad de Tejas Verdes, donde la anchura va de unos 100 a 200 m. No hay aquí desviación del cauce por efectos de residuos de terrazas, como en el Rapel, y la inflexión, mucho menor, sólo está indicada hacia la desembocadura misma por efectos de deriva litoral. A partir de las puntas de Santo Domingo se desarrolla una flecha litoral que desvía el río hacia el N y que sólo tiende a romperse en caso de crecidas. Así como en el Rapel, también se desarrolla una barra submarina que la deriva proyecta hacia el N.

Hidrológicamente hablando, la pendiente del eje hidráulico es cercana a los 10' y un poco superior a la del Rapel. Desde el punto de vista clinométrico, las condiciones de penetración de la onda de marea son —por consiguiente— parecidas. En cuanto al régimen natural, éste es transformado scriamente hacia la desembocadura, por concepto del emplco de las aguas para el regadío, siendo por lo tanto las crecidas las que condicionan las transformaciones más importantes del eje hidráulico. Actualmente la curva anual tiende a mostrar máximos en junio o julio y diciembre a enero, y mínimos en marzo o abril, de acuerdo con lo que se registra en Cabimbao. El ritmo de la marea se ve afectado por la distribución de estos gastos.

Comparación importante:

Interpolando para San Antonio los valores computados en las Tablas de Mareas (*Inst. Hidrográfico de la Armada, 1969-1970*) para los días de muestreo, se tienen para sicigias amplitudes de la llenante entre 1,36 y 1,58 m. y de la vaciante, entre 1,49 y 1,39 m., lo que da una idea del margen en que varía el nivel hidráulico y, por lo tanto, los *perfiles instantáneos de las mareas* al fin del flujo y al final del reflujo. Frente a esta situación, el Rapel trabaja a pulsaciones derivadas del sistema de evacuación de la central hidroeléctrica, y el Maipo con sus máximos de estaciones opuestas y mínimos de estación media.

Trascendental es la diferencia de turbidez de las aguas de ambos ríos. El río Rapel, con la *capacidad decantadora (desarenadora)* del embalse y la poca pendiente y estrechez del valle inferior, presenta aguas claras y relativamente transparentes. El río Maipo, sin efectos decantadores importantes, muestra aguas turbias con una transparencia mínima y que en enero de 1970 no fue más que de 20 cm.

Morfológicamente hablando, el Rapel inferior inmediato a la desembocadura llena más con su cuerpo de aguas el fondo del valle que el Maipo, el cual divaga por el lecho hasta muy cerca del mar. Ello hace que el primero se acerque más a la forma típica de un estuario que el segundo.

4. SITUACION TERMOHALINA

El Rapel

En condiciones de flujo y en corrientes de marea de sicigias, con amplitud aproximada de 1,50 m. y a fines de primavera, se encontraron las condiciones hidrológicas reflejadas en la figura 2, donde se pueden hacer las siguientes observaciones:

- Tanto las isohalinas como las isotermas tienden a la horizontal.
- Isohalinas e isotermas están más juntas hacia el fondo y más espaciadas hacia la superficie.
- La separación entre estos dos tipos de espaciamiento es más notoria y drástica hacia el interior, habiendo más homogeneidad de espaciamiento hacia la desembocadura.
- Más o menos a 1 km. de esta última hay inflexiones de las isolíneas con tendencia a la verticalidad hacia la superficie.
- La diferencia de salinidad entre la superficie y el fondo es muy grande, y en la superficie lo es desde el interior hasta la desembocadura.
- En el caso de la temperatura la diferencia es notoria, pero no tan grande. Su variación es evidente con la profundidad, pero poco apreciable en la superficie.

De la figura 4, con diagramas T-S y curvas de sigma-T, se deduce que hasta la estación 3 del corte hay dos grupos de tipos de agua extremos:

a) El que engloba tipos con salinidades en general inferiores a 1‰ y excepcionalmente superiores a 2‰, que en el *Sistema de Venecia* pueden llamarse *limnéticos* a *oligohalinos*. En el sistema de S. Ekman (1953, en R. A. RINGUELET, 1962), se trata de *aguas dulces* (hasta 0,5‰) y *salobres oligohalinas* (hasta 3‰). Sus temperaturas están entre 15,7 y 16,2°, aproximadamente.

b) El de salinidad superior a 28,5‰ y hasta 31,1‰. Según el *Sistema de Venecia* son aguas *polihalinas*. S. Ekman emplea un término más expresivo para estos rangos: *agua de mar oligohalina*.

Hacia la estación 4 se encuentra el grupo a) y otro que se centra en el tipo 7,56‰ de S y 15,3° de t, que corresponde a agua *oligo a mesohalina* en el *Sistema de Venecia*, pero que con Ekman se puede precisar como *agua salobre mesohalina*, sin entrar todavía en lo que él propone como agua de mar.

Entre las agrupaciones de tipos extremos para las diversas estaciones *están todos los tipos que van desde el agua de mar oligohalina a la dulce de Ekman*.

Se advierte, a partir de estas dos agrupaciones de tipos de agua, que la gradación es más continua hacia la desembocadura y más discontinua hacia la estación 4. A partir de las inflexiones de las isolíneas, esta discontinuidad se manifiesta a profundidades del orden de los 3 m., comenzando un cambio brusco

RAPEL DESEMBOCADURA

(Fig. 2)

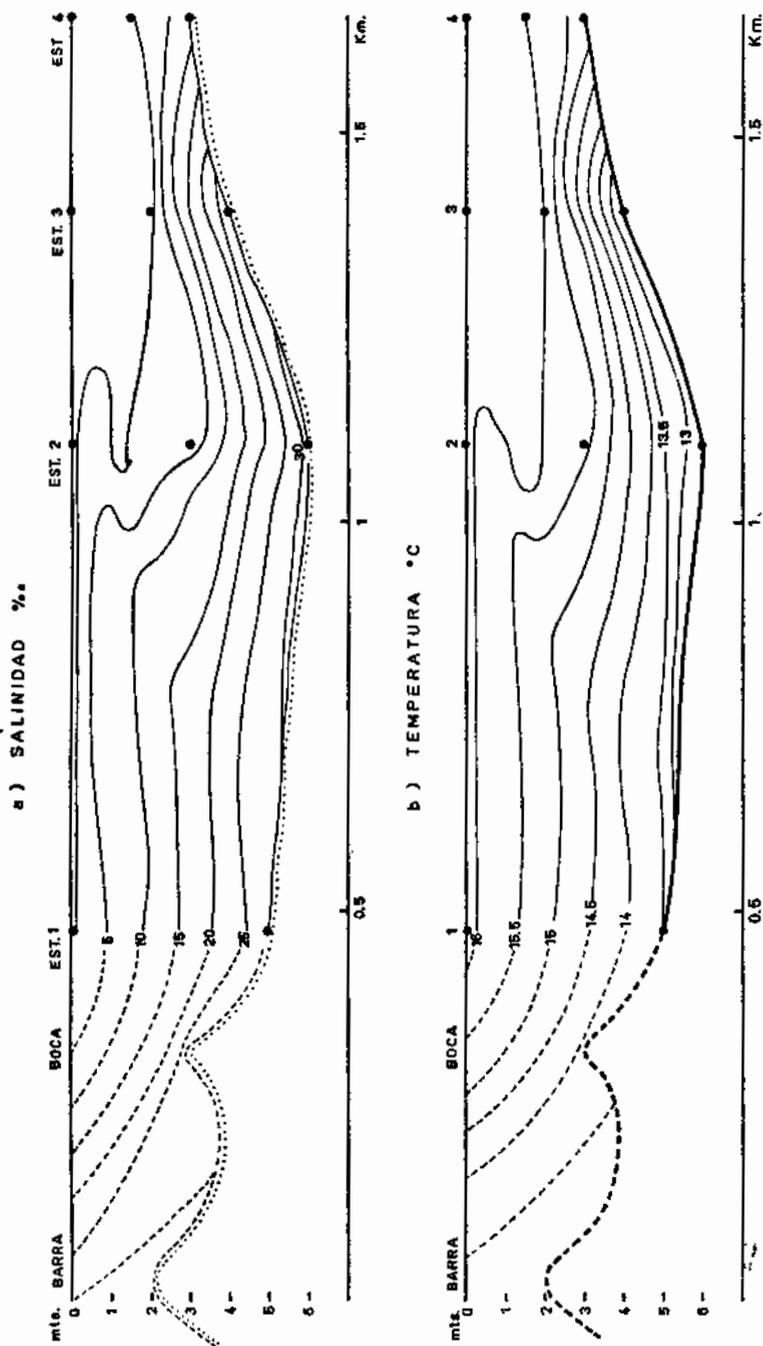
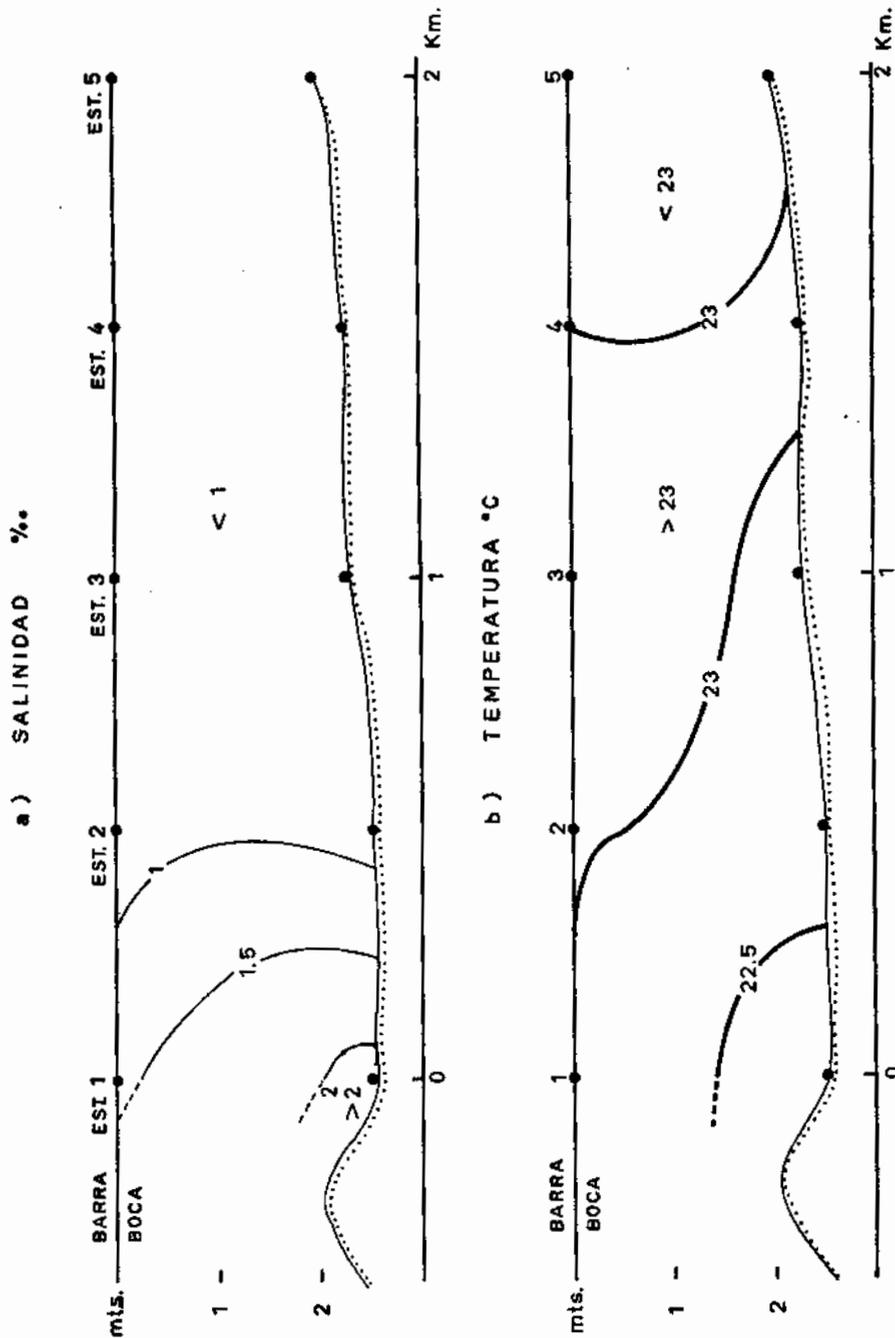


Fig. 2. Isohalinas e isotermas del Rapel en corte longitudinal.

MAIPO DESEMBOCADURA

(Fig. 3)



de temperaturas y salinidades hacia el fondo, lo que sugiere la existencia de termoclina y haloclina de carácter cinemático.

Resumiendo, para estos cortes del *perfil instantáneo* de un momento del flujo de sicigias, se presentan:

a) En la superficie, *agua dulce* hasta cerca de la desembocadura. Hacia el interior, se encuentra a profundidades superiores al metro, con temperaturas sobre 16°. Superficialmente se la halla hasta poco menos de 2 km. de la desembocadura. Más abajo, se tiene *agua oligohalina*, que es posible encontrar en superficie entre la desembocadura y menos de 2 km. al interior. Río adentro, está francamente por debajo y se la empieza a detectar a unos 3 m. de profundidad en la estación 2 con salinidad hasta 5‰ y temperatura entre 15,5 y 16°.

b) Formando una especie de cuña bajo las aguas indicadas, hay otras de 5 a más de 30‰ de salinidad y de 15,5 a menos de 10° de temperatura, que van de los tipos *mesohalinos* a los *polihalinos de Venecia* y del *agua salobre mesohalina* hasta el *agua de mar mesohalina de Ekman*.

En la parte más deprimida del fondo, frente a la estación 2, hay un foco de agua que pasa a la categoría de *mixocuhalina de Venecia* y que sigue siendo de mar mesohalina para Ekman.

El Maipo

Aquí se encontró una situación muy diferente y de mucha homogeneidad. De todas maneras se dibujaron los cortes para esclarecer más la explicación (Fig. 3).

Ubicando estas aguas en el diagrama T-S (Fig. 4), se ve que todas están en salinidades muy bajas que apenas pasan el 2‰, y temperaturas entre 22 y más 23°, debido a que se muestreó en enero de 1970 y con día despejado. Todos los tipos son oligohalinos, pero la mayoría de ellos con tendencia dulce. Sólo cerca de la desembocadura se encontró una gradación significativa de salinidad: 1,37‰ en la superficie y 2,14‰ en el fondo. Más al interior, todas las salinidades son inferiores a 1‰ y del orden de 0,75. Como el tercer decimal es dudoso, no se puede establecer estratificación por salinidad en estos otros casos. La temperatura muestra pequeños rasgos de estratificación hacia la desembocadura.

Pese a lo anotado, es incuestionable que junto a la boca la influencia del agua salada se manifiesta hacia el fondo. Una diferencia de casi 1‰ de salinidad y de 0,7° de temperatura es significativa. Al contrario del Rapel, las isohalinas toman posición casi vertical, mostrando una gradiente de consideración hacia la desembocadura. Algo parecido se nota en las isotermas. Ambas isolíneas indican inestabilidad en la estratificación vertical.

5. DISTRIBUCION DE LA DENSIDAD Y MEZCLAS

El Rapel.

Los resultados del cómputo de sigma-T están graficados en el diagrama T-S. En la distribución, la dispersión de los valores de esta variable es muy grande: desde $-0,70$ (aprox.) a $23,50$ (aprox.). Siguiendo con los grupos de tipos de agua distinguidos en el punto anterior, se puede decir que más que de simple dispersión se puede hablar de polarización de la densidad, distinguiéndose:

a) Los tipos dulces y oligohalinos, con sigma-T desde $-0,70$ (aprox.) a $3,00$ (aprox.), arriba;

b) Los tipos poli a mesohalinos (agua salobre a agua de mar), con sigma-T entre $3,00$ y $23,50$ (aprox.), que forman una cuña salobre y francamente más densa. En estos tipos, el agua salobre polihalina de Ekman (entre 10 y 17% de S) está separada del agua de mar del mismo autor por sigma-T entre $12,30$ y $12,40$ (aprox.), pudiéndose ubicar en el corte de la figura 2, entre las isolíneas de 15 y 20% (grosso modo).

Hay, entonces, serias diferencias densimétricas entre el agua superficial y la cuña. Aparece, por consiguiente, una capa laminar de contacto entre el agua dulce y oligohalina de superficie y la *cuña salobre y con agua de mar: la interface*. Sin embargo, esta interface no se aprecia desde la desembocadura misma, sino aproximadamente a 800 metros de ella. Hasta esta distancia de la boca no se percibe una capa notoria de contacto entre las dos masas esenciales con los tipos de agua distinguidos anteriormente. La gradación es paulatina, pasando por las densidades que revelan las curvas sigma-T. A partir de 1 km. hacia adentro, ya se puede hablar de la constitución de la cuña salobre, que llega con nitidez hasta más de $1,5$ km. y es en este sector donde la interface destaca claramente, dando la sensación de la existencia de termo y haloclina.

La observación de la relación T-S (Fig. 4) para la estación 2 muestra mayor inflexión de esta línea con relación a las otras. Esto, comparado con las sinuosidades de las isolíneas superficiales, indica el papel de la turbulencia cuando se empieza a organizar la interface.

Estos hechos llevan a poner en juego la *intensidad de la gradiente* con respecto al carácter de las mezclas. En el primer kilómetro de los cortes hay gradiente regular y continua. Las mezclas de aguas son incuestionablemente *verticales*, normales a las superficies sigma-T. En la zona de la interface, por ejemplo en la estación 3, la tendencia a mezclas parece muy baja, respetándose la ley de la *inmiscibilidad*. En otras palabras, el sector exterior y el de la gradiente con cuña (interface) tienen un comportamiento distinto.

Por otra parte, la tendencia a la inflexión en las bajas densidades de la relación T-S para la estación 2, indica el papel de la *turbulencia en las mezclas*, que se ve también en la disposición de las isolíneas. Ello manifiesta la *antítesis* entre la corriente de marea y el gasto fluvial, lo que ayuda a llegar a un

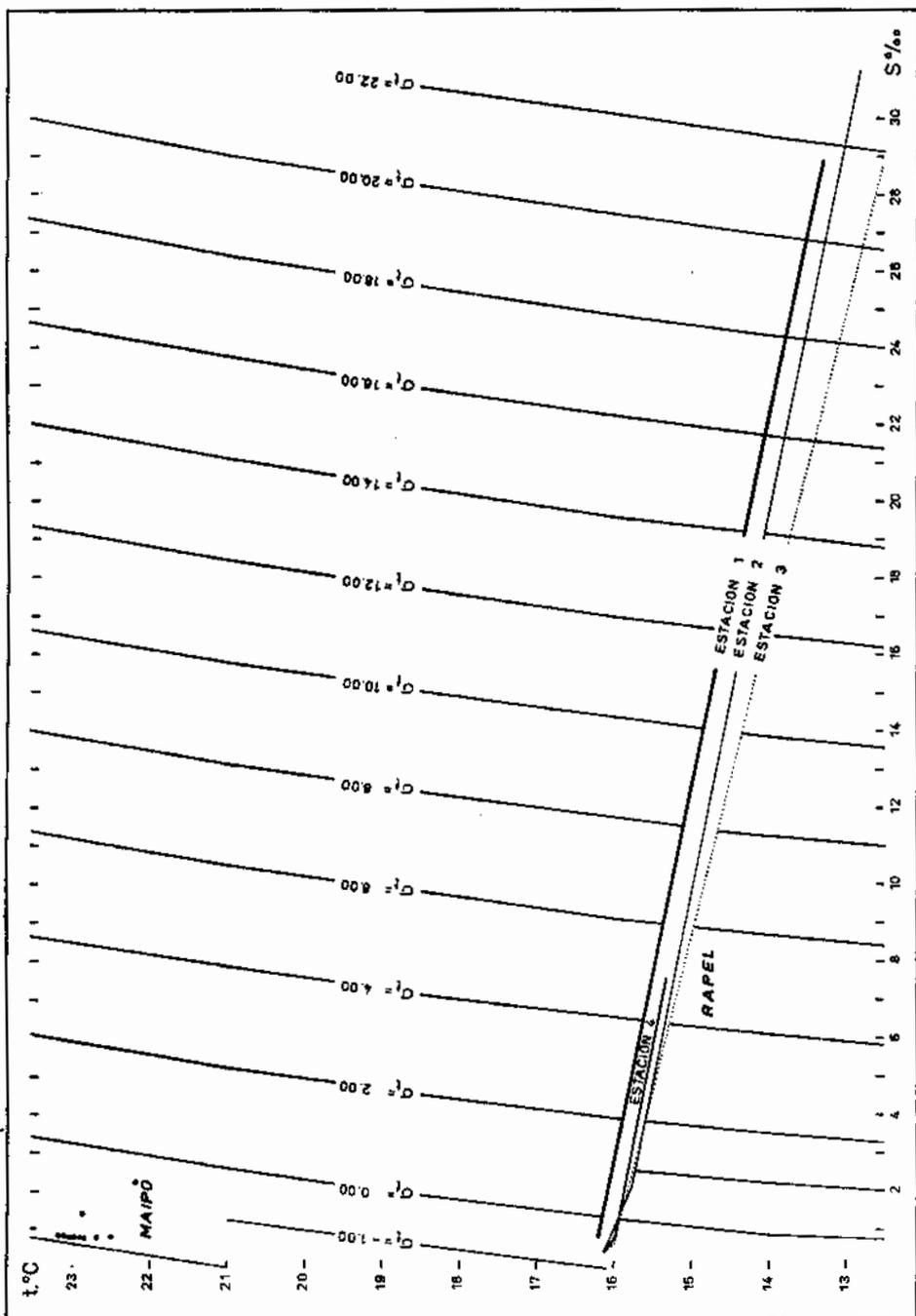


Fig. 4. Relaciones T-S y curvas de Sigma-T para el Maipo y el Rapel.

esquema para esclarecer el fenómeno en cuestión y que permita encuadrarlo dentro de los modelos establecidos por los trabajos de H. STOMMEL (1953, in K. F. BOWDEN, 1967), cuyo esquema de clasificación de los fenómenos estuariales está basado en el carácter físico de la circulación.

En el caso analizado, éste debe estar condicionado por las corrientes de marea que, de acuerdo con las investigaciones citadas, ejercen influencia a través de las mezclas turbulentas que producen. Tienden a romper la interface mezclando los tipos de agua de la columna en el primer sector, y formando una cuña con interface en el segundo, hacia el interior. La amplitud de la marea, que en sicigias es del orden de 1,5 m., es capaz de producir corriente río arriba y sobre el fondo. Una parte de su energía, como anota K. F. BOWDEN (1967), es convertida en energía cinética de turbulencia, parte de la cual es usada para incrementar la energía potencial del agua por mezclas verticales normales a las superficies sigma-T.

Por lo tanto, este ambiente de desembocadura parece ser un caso mixto entre los distinguidos por H. STOMMEL, cuyos tres primeros tipos se pueden poner aquí en juego. O sea, en la *parte exterior*, de *gradiente continua*, se da el tipo con *flujo en dos horizontes* en sentido contrario y con *mezclas verticales*; en la *parte interior*, de *gradiente con interface*, el tipo de *cuña salobre*.

El Maipo.

Los valores de sigma-T correspondientes al Maipo son muy poco dispersos y muy bajos: de $-1,8$ a $-0,6$ aproximadamente. Las estaciones más dispersas están hacia la desembocadura, donde sigma-T se acerca a 0, pero siempre negativo.

Esto significa agua homogénea y de predominio netamente fluvial. La observación de la distribución con respecto a las superficies sigma-T sugiere mezclas de carácter preferentemente *lateral*, lo que acusa una diferencia notoria con respecto al Rapel. En efecto, ellas tienden a ser paralelas a las superficies isopícnas. En la estación 1, junto a la desembocadura, el ángulo es muy pequeño y en las demás estaciones, éste casi no existe.

Recordando el trazado de las isolíneas se comprende mejor la *mezcla lateral*. Ella es predominante en profundidad hacia la desembocadura y de tendencia horizontal hacia el interior. De acuerdo con el esquema de STOMMEL se cumple la *gradiente horizontal de salinidad y de densidad*, pero sin apreciarse una variación notable de las propiedades del agua. Existe una *difusión lateral* por flujo turbulento. Ello se comprende mejor si se toma en cuenta una amplitud de marea de cuadratura, que es de unos 90 cm.

6. DISCUSION

Para evaluar la confiabilidad y significación geográfica de estos resultados, es conveniente definir primero qué son los cuerpos de agua que se estudian

dentro de su marco hidrogeomorfológico. Preliminarmente hay que decidir si se trata o no de estuarios.

La definición de D. W. PRITCHARD (1967), de aceptación por los especialistas, dice: "Un estuario es un cuerpo de aguas costero que tiene una conexión libre con el mar abierto y desde el cual el agua de mar es mensurablemente diluida con agua dulce, derivada del drenaje continental". "La dilución del agua de mar provee los gradientes de densidad característicos de los patrones de circulación". Conjuntamente, H. CASPERS (1967), teniendo en cuenta los trabajos de Emery y Stevenson recuerda que, siendo la condición de marea el principal factor, deben excluirse aquellas desembocaduras de mares sin mareas, como las del Mediterráneo.

Los ejemplos analizados no entran en el caso indicado por CASPERS. Las amplitudes de marea, sin ser altas, son suficientes para producir corrientes de marea, cuya onda probadamente causa *marea dinámica estuarial* y, según la dilución del agua salada hacia la superficie, *marea de salinidad*. Informaciones locales dan a entender que la marea dinámica puede ascender hasta unos 7 km. río arriba en el Rapel, aproximadamente hasta la localidad de Licancheu. Esto es fácil de aceptar, si se considera la evolución del perfil longitudinal del río en este sector, lo que da escasa pendiente al eje hidráulico en relación con la amplitud de la marea. El río Maipo desemboca también en condiciones parecidas, aunque posiblemente con un perfil de equilibrio menos avanzado.

Partiendo de la base de que los fenómenos estudiados son estuariales, la discusión se centrará en el grado de generalización que se puede hacer de estos resultados y en el valor de la comparación entre ambos ambientes de desembocadura.

Grado de generalización de los resultados.

Los cortes levantados en las desembocaduras de los ríos Rapel y Maipo tienen carácter instantáneo, y, para poder establecer algunas normas generales sobre su base, hay que discutir el valor de la muestra en el tiempo.

En realidad, ambas muestras fueron tomadas en flujo, pero la del Rapel fue en sicigias y la del Maipo, en cuadraturas, con una diferencia de amplitud de mareas del orden de los 50 a 60 cm. Por otro lado, la muestra del Rapel fue tomada más cerca de la *estoa* que la del Maipo. No se consideró el *defasaje* o diferencia de tiempo entre la corriente y la onda en la costa. Se corroboró el pronóstico de marea sólo con observaciones fluviales y consultas locales. El empleo de una botella de deriva reveló que el defasaje es pequeño y que el cómputo de la onda de marea a partir de las tablas basta, siempre que no se trabaje demasiado río adentro.

En consecuencia, los antecedentes aportados son válidos para los estados de pleamar de sicigias y cuadraturas, en los casos del Rapel y del Maipo, respectivamente. Dada la seguridad de la elección de la muestra, los resultados pueden

generalizarse para estos estados y para el gasto de los ríos en ellos, factor este último difícil de controlar.

Al cambiar estas situaciones con el estado de marea y el gasto, el movimiento mareal hace moverse las isohalinas río arriba y río abajo, produciéndose diferentes tipos de mezclas de origen cinemático, con cambios en el sentido de la corriente, generando corrientes de densidad, tal como puede desprenderse de las relaciones T-S en función de $\sigma\text{-T}$. Esto debe hacer cambiar la intensidad de las gradientes, reguladoras del carácter de las mezclas.

La aproximación de las superficies isohalinas con el flujo debe dejar de existir con el reflujó, tendiendo a perderse la interface.

En resumen, estos resultados no pueden dar cuenta de un régimen, sino sólo de las situaciones en flujo, y ese es el alcance y la intención del trabajo.

Valor de la comparación entre ambos ambientes de desembocadura.

Además de que los estados de marea no son exactamente iguales para cada caso, hay que anotar que la interacción entre el gasto fluvial y la corriente de marea depende de la forma y dimensiones físicas del estuario, y en esto se indicaron diferencias al analizar el ambiente físico.

Aunque las diferencias de pendiente del eje hidráulico son mínimas, las de forma y profundidad del cuerpo de aguas son notorias, dentro del orden de tamaño de los casos estudiados. Los resultados de otros trabajos sistemáticos, como los de STOMMEL, PRITCHARD y KETCHUM (en BOWDEN), tácitamente dejan entender que las relaciones entre el perfil longitudinal y el mar como nivel de base pueden influir en la circulación. Han surgido modelos que BOWDEN (1967) recoge considerando la forma del fondo como variable. Por ejemplo, el perfil longitudinal de los fiordos parece favorecer el flujo en dos horizontes sin cuña salobre nítida y donde pierde importancia la fricción interfacial. En los casos del Rapel y del Maipo las profundidades y las formas son diferentes (Figs. 1, 2 y 3), lo que debe afectar la forma en que penetra la onda de marea.

Por otro lado, las aguas de ambos ríos son distintas: claras en el Rapel y turbias en el Maipo. Esto naturalmente afecta a la densidad y, por ende, al comportamiento del agua de mar al penetrar al río. La estratificación en el Rapel obedece a aguas fluviales claras. En cambio, la turbidez del Maipo afecta a la densidad de sus aguas. Esta turbidez no es incluida en el cómputo de $\sigma\text{-T}$ como factor de la densidad, de tal manera que su valor habría que sumarlo al computado sobre la base de la salinidad y la temperatura. En otras palabras, la comparación de $\sigma\text{-T}$ para los dos casos analizados sólo puede hacerse desentendiéndose de la turbidez del Maipo. Este factor de variabilidad es muy grande para este último. Ya se dijo que su transparencia fue de alrededor de 20 cm. en la muestra y ello implica una carga sólida considerable, que puede ser aún mayor. La capacidad del gasto del Maipo hacia el mar se evidencia en las épocas de altas aguas, donde el gasto sólido produce gran turbidez en las

aguas de mar circundantes a la desembocadura. De acuerdo con J. F. ARAYA (1966), la aureola de mayor turbidez llega a más o menos 1,8 millas de la costa en verano. Después hay una zona de mezclas con otras aureolas de turbidez un tanto más tenues en un ancho de 5 a 6 millas y que emigra hacia el N. En ambos casos se observa la tendencia inicial a la inmiscibilidad.

Por otra parte, mientras en el Rapel las estaciones de muestreo en el corte se hicieron en la línea media, coincidiera o no con el thalweg e hilos de agua, en el Maipo hubo en general que hacer el muestreo en los hilos de agua, donde la corriente tiene más velocidad, debido a que se podía allí conseguir mayor profundidad. Naturalmente que esto debe influir en los resultados, especialmente de salinidad, por tratarse de una parte de la sección con notable influencia fluvial. Pero en vista de que hacia la desembocadura no fue necesaria esta elección, dándose también el caso de bajos valores de salinidad y de disposición vertical de las isohalinas, el factor de variabilidad anotado no parece ser decisivo. Los resultados pueden considerarse confiables desde el punto de vista del muestreo.

En seguida, se verá de qué manera se puede relacionar la salinidad, con la circulación y la estratificación.

Criterio densimétrico para relacionar la salinidad con la circulación y la estratificación.

Siguiendo el criterio expuesto por J. Murray, la salinidad media de los ríos es de 0,18‰, y según el de HOWES (1939, en RINGUELET) las aguas interiores, si tienen un porcentaje alto de iones en disolución, son "saladas" pero no "salobres", reservándose este último término para el agua de mar diluida. Parece razonable el límite superior dado por Mölder y Steuer al agua salobre: 30‰, siempre que se aplique a medios estuariales u otros similares.

Pero lo más interesante es fijar aquí el papel dinámico de las diluciones y sus diferentes rangos. RINGUELET indica que vale la pena recordar los trabajos de KNIPOVITCH en 1932, los cuales podrían servir para distinguir el agua salobre de la marina. Según ellos (en SVERDRUP H. U., M. W. JOHNSON, R. H. FLEMING, 1942 y 1961), a la salinidad 24,7‰ el punto de congelación y el de máxima densidad del agua coinciden (-1,33°C). Para salinidades superiores (agua salobre a marina) los enfriamientos no producen comúnmente inversión térmica y el agua enfriada tiende a hundirse a través de la igual salinidad. En cambio, mientras más baja es la salinidad, mayor es la tendencia a la inversión por enfriamiento sin movimiento vertical de agua. En los medios estuariales, esta distinción tiene importancia en la circulación y, en las mezclas, debe considerarse como factor de variabilidad en el tiempo. La posibilidad de circulación vertical por este concepto, es mayor en el agua marina que en la salobre y en la dulce y, en vez de favorecer las mezclas entre una y otra, promueve sólo intercambio en el agua marina. En la fig. 2a puede considerarse la insohalina de

25‰ como delimitadora aproximada de estos dos tipos de comportamiento. Sin embargo, esto es teórico, ya que las condiciones hidrodinámicas en que funcionan los ambientes estuariales estudiados hacen difícil suponer temperaturas demasiado bajas, tanto en las aguas fluviales como en las marinas. De todas maneras, vale la pena reservar la salinidad de 24,7‰ como límite de distinción por su significación hidrodinámica.

7. CONCLUSIONES

1) Estos resultados deben referirse solamente a situaciones de flujo de sicigias para el Rapel y de cuadraturas para el Maipo, en cuanto a su grado de generalización.

2) Entre ambos casos, las situaciones deben ser comparadas teniendo en cuenta las diferencias de régimen, de gasto sólido, de morfología y de marea que los separan.

3) El Rapel, con aguas claras, presenta una estratificación marcada en profundidad, con aguas dulces y oligohalinas arriba y polihalinas a mesosalinas abajo (agua de mar oligohalina a mesohalina). El Maipo carece de esta estratificación marcada y sus aguas se manifiestan desde dulces a oligohalinas.

4) La posición de las superficies isopícnas es diferente con respecto a los tipos de agua en ambos casos, acusando modos distintos de circulación. En el Rapel, el agua más densa y más salada fluye por debajo, indicando una estratificación con *gradiente moderada hacia el mar* y con *discontinuidad y cuña salobre hacia el río*, incluyendo una *interface*. En el Maipo, la distribución de la densidad muestra homogeneidad y rangos bajos, sin flujo a dos niveles notorio.

5) Las mezclas son verticales en el Rapel y laterales en el Maipo, lo que sugiere que, en el primer caso, la influencia de la salinidad debe manifestarse con pocas mezclas hacia la superficie, haciendo que la cuña salobre sea más nítida hacia el interior. En el segundo caso, en cambio, el efecto se traduce en *marea de salinidad* con mezclas abundantes hacia la superficie.

6) En razón de que los resultados expuestos se refieren a una situación determinada de marea y gasto, es evidente que ella cambia con la variación de estos factores, lo que acarrea una movilización hacia arriba, hacia abajo y en profundidad de las superficies isohalinas, isotermas e isopícnas. Las corrientes de marea ejercen una profunda influencia a través de la mezcla turbulenta, lo que debe tender a romper la interface entre el agua del río y la marina.

7) De acuerdo con el esquema de clasificación de STOMMEL, el ambiente de desembocadura del Rapel se comporta como un medio estuarial de *cuña salobre hacia el interior* y de *corriente a dos niveles con mezcla vertical hacia el mar*, en situación de flujo de sicigias. El Maipo lo hace en gran parte como un *medio verticalmente homogéneo*, en flujo de cuadraturas. Hay que insistir, para esta diferencia, en el factor turbidez, no expuesto con claridad en el esquema que cita BOWDEN.

8) Además de los factores naturales, esta diferencia de comportamiento entre el Rapel y el Maipo refleja un buen grado de intervención humana en el paisaje del interior. En efecto, la construcción del embalse de Rapel para la central hidroeléctrica afectó al proceso de sedimentación en la hoya y reguló el gasto aguas abajo, condicionando una mayor tendencia a la claridad de las aguas. Por otra parte, el hecho de que las unidades de la planta funcionen o no, y de que no funcionen siempre el mismo número, hace que el gasto varíe con pulsaciones violentas, a lo que hay que agregar los casos en que pueden funcionar los sistemas de evacuación de creces.

El Maipo no sufre estos efectos, pero está sometido a las vaciitudes del uso de sus aguas para el regadío.

Así, los regímenes naturales pueden ser poco significativos hacia la desembocadura, especialmente en el caso del Rapel. En el Maipo, la influencia natural más segura se tiene en la estación invernal, con las crecidas pluviales, porque las altas aguas medias estivales pueden ser notoriamente modificadas y ponderadas.

Se puede establecer entonces que el factor de variabilidad periódica principal es la marea, cuyos parámetros pueden establecerse con más confiabilidad que los del gasto, con el fin de llegar a una generalización.

9) Esta reunión de factores influye en las condiciones ecológicas, como lo muestran la interface del Rapel y la turbidez del Maipo. Dichas influencias son de fundamental importancia para el acondicionamiento de estos sectores.

8. AGRADECIMIENTOS.

Durante el maestreo debe considerarse como digna de reconocimiento la labor de los siguientes alumnos que realizan con el autor un seminario curricular:

SONIA ACHARÁN BLAU, CARLOS GARÍN, JOSÉ P. REYES FRANZANI, JULIA RODRÍGUEZ LEIVA, y OLGA INÉS URIBE CASANUEVA. Cupo también participación a la bióloga Srta. MATILDE LÓPEZ.

El empleo del salinómetro "Auto-lab" del Instituto de Fomento Pesquero se debió a la desinteresada gestión de los señores OMAR ROJAS y JOSÉ PINEDA.

La colaboración logística de los señores JULIO REYES y EMILIO MUÑOZ fue fundamental. Los dibujantes del Departamento pusieron en limpio las ilustraciones.

9. COLOQUIO

Con posterioridad a su redacción, este trabajo fue leído en una sesión ordinaria de la *Sociedad Chilena de Historia Natural*, el 23 de septiembre de 1970, dando lugar al siguiente coloquio:

Prof. Julio Montané (Arquécologo):— ¿Qué papel real juega la diferencia de gradiente de los ríos? ¿Cuál es la influencia del banco de arena del Rapel?

¿Cómo se reflejan las diferencias entre ambos ambientes en la fauna y en la flora?

Autor: La diferencia de gradiente puede considerarse despreciable para la penetración de la onda de marea en los estuarios citados; ella parece ser más significativa en las diferencias de velocidad de la corriente fluvial. La velocidad en el Maipo debe ser mayor, causa por la cual puede comprenderse una impronta fluvial más decisiva. En cuanto al banco de arenas de Rapel, sería más fácil la penetración de la corriente de flujo si éste no existiera. Actualmente se observa que influye mucho en la difracción del oleaje para la parte exterior del estuario, desde el punto de vista de su agitación, lo que puede tener una repercusión ecológica importante. En lo referente al reflejo de las variantes en la fauna y en la flora, son los biólogos los encargados de dar en el futuro esta respuesta.

Sr. Sergio Cabrera (Biólogo) Con respecto a la turbidez del Maipo ¿ésta es de naturaleza orgánica o inorgánica?

Autor: La turbidez del Maipo es esencialmente inorgánica y también, como recuerda el Sr. Cabrera, es importante la polución, por intervención humana aguas arriba.

Sr. Cabrera: También hay que considerar que la temperatura cambia mucho en el tiempo.

Autor: Efectivamente, y por lo tanto el indicador más importante de la circulación y las diluciones es la salinidad.

Prof. Nivaldo Bahamonde (Hidrobiólogo): ¿Quiere decir, según los resultados, que las aguas del Maipo son mucho más homogéneas?

Autor: Por cierto, y eso parece ser una evidencia incuestionable.

Prof. Bahamonde: Es importante que se haya encontrado diferencias entre los medios del Maipo y del Rapel. Por lo menos ya se puede estar seguro de ello.

Prof. R. Börgel (Geógrafo): Hay que considerar, sin embargo, que los cambios geomorfológicos del litoral pueden ir influyendo en la transformación de las condiciones.

Autor: Sin duda. Por ejemplo, está probado que el banco de arenas de la boca del Rapel ha cambiado en relativamente poco tiempo a escala histórica. La comparación de las cartas topográficas y de las fotografías aéreas lo demuestra. La formación del banco actual parece deberse a cambios en el régimen del río. Por otra parte, la barra submarina del Rapel fue por un tiempo una isla, como lo revelan las fotografías aéreas y la carta al 50.000, y ello puede deberse a la transformación en las condiciones de deriva litoral y de oleaje. No en todos los

años las ondas del oleaje oceánico tienen el mismo período significativo y ello hace variar su reacción en las aguas someras. También, y de acuerdo con preguntas de otros señores socios, hay transformaciones probadas con respecto a la desembocadura del Maipo. Ellas fueron causadas por la construcción del malecón del puerto de San Antonio. Antes el río desembocaba más al interior. La existencia del malecón hizo avanzar el litoral arenoso hacia el mar de acuerdo con las leyes de regulación de las costas. A partir de punta Sto. Domingo, el cordón litoral hace desviarse el río hacia el N, según la componente media de la deriva. Ello está en relación con la dirección más común del oleaje, que es SW.

Sr. Cabrera: ¿Por qué razones se producen en el Rapel mezclas verticales y en el Maipo, laterales?

Autor: Como se dejó entender a través de la exposición, las condiciones de enfrentamiento de aguas fluviales y marinas son distintas en los casos analizados. Las diferencias de densidad son mayores en el Rapel que en el Maipo. En el primero hay una gradiente vertical muy notoria, lo que obliga a las mezclas a producirse en el sentido transversal a las superficies isopícnas. La mayor homogeneidad del segundo facilita mezclas en el sentido de estas superficies.

Sr. Presidente (R. Covarrubias, Biólogo): Durante la exposición se citaron medidas de pH, pero no se indicaron resultados ni su significación. ¿Qué alcance tuvieron?

Autor: En realidad, esa fue una medida adyacente y de poca precisión (colorimétrica). Se tomó sin mayores pretensiones. En el caso del Maipo resultaron reacciones con tendencia ácida. Sin embargo, sería conveniente sistematizar más esta medida en el futuro, determinándola potenciométricamente.

Sr. Presidente: En vista de que la marea y la corriente del río producen estados transitorios, sería necesario saber qué grado de simultaneidad tuvo el muestreo.

Autor: La pregunta es muy importante y este tema debió ser incluido en la discusión. Desde el punto de vista metodológico, el tiempo en que se realice el corte es fundamental, porque los fenómenos estuariales tienen una variabilidad en el tiempo mucho mayor que los de alta mar. El criterio para realizar un corte oceanográfico es distinto que el empleado en un corte estuarial. Si las muestras no se toman al mismo tiempo hay una fuente de error. Pero este error se achica si se considera que el tiempo del muestreo abarca un período muy inferior al empleado por la corriente de flujo para llegar a la estoa. A pesar de ello, sería conveniente realizar las muestras al mismo tiempo y en diferentes embarcaciones.

Sr. Presidente: ¿Qué propósito tuvo el trabajo?

Autor: 1) Iniciar el estudio de los fenómenos estuariales en Chile, sobre los que nada se sabía. 2) Encontrar el reflejo de las transformaciones humanas en el paisaje del interior sobre ellos. 3) Indicar fenómenos significativos para la comprensión de estos ambientes por los biólogos. 4) Dar el primer paso hacia la determinación de regímenes estuariales, lo que necesitará muestras periódicas.

Prof. Börgel: ¿Sería posible considerar que en la diferencia entre ambos ambientes pueden influir el efecto geostrófico en las ondas de marea y las vicisitudes de la plataforma continental inmediata?

Autor: El efecto geostrófico sobre el desplazamiento de la onda de marea habría que tomarlo a la escala del Pacífico Suroriental. En este caso no hay diferencias entre uno y otro de los ejemplos estudiados con respecto al funcionamiento del sistema anfidrómico. Aplicada la pregunta a pequeños cuerpos de agua como los de estos estuarios, no se conocen trabajos sistemáticos que tomen en cuenta la fuerza de Coriolis dentro de ellos. Mayor efecto diferencial podría tener la plataforma continental por concepto de resonancia, pero no se conocen bien las diferencias entre ambos tramos de ella, de los cuales sólo se ha estudiado el que está frente al Maipo (J. F. ARAYA, 1966). En todo caso, esas diferencias deben ser pequeñas y no se sabría expresarlas con respecto a la onda de marea.

Prof. Bahamonde: Considera que estos trabajos son muy importantes. En el sur de Chile van a tener trascendencia para comprender el ambiente en que viven los mariscos. Aquí, hay toda una ambigüedad conceptual para determinar que son, por ejemplo, los llamados "esteros" y los fiordos de acuerdo con su comportamiento hidrológico y en relación con su significado ecológico. En este trabajo se ha demostrado que estos estudios pueden realizarse con medios relativamente modestos y que permiten, en cambio, encontrar relaciones más o menos claras.

Junto con agregarlas a su trabajo, el autor agradece las preguntas y sugerencias hechas por las personas que participaron en esta discusión, que ha servido para enriquecer el contenido de las conclusiones.

REFERENCIAS

- ARAYA, J. F. (1966). *Metodología geomorfológica para el estudio de las costas y plataforma de Chile*. Mem. 1.er Semin. L. Amer. Oc. Pacífico Oriental. Lima, Perú: 176-177.
- BOWDEN, K. F. (1967). *Circulation and Diffusion* (En: *Estuaries*, G. H. LAUFF, ed.). Am. Ass. Adv. of Sc. Publ. 83. Wash. D.C. 2: 15-36.
- CASPERS, H. (1967). *Estuaries: Analysis of Definitions and Biological Considerations* (En: *Estuaries*, G. H. LAUFF, ed.). Am. Ass. Adv. of Sc. Publ. 83. Wash. D.C. 1: 6-8.

- FUENZALIDA, H. (1965). *Hidrografía* (En: Geogr. Económ. CORFO). Sigo.: 173-175.
- INSTITUTO HIDROGR. ARMADA DE CHILE. (1969-1970). *Tablas de Mareas de la Costa de Chile*. Valp. Tablas 1969 y 1970.
- KNUDSEN, M. (1901). *Hydrographical Tables*. Repr. 1962. G. M. Manuf. Co. N. Y. 63 págs.
- MANGELSDORF, JR. P. C. (1967). *Salinity Measurements in Estuaries* (En: *Estuaries*, G. H. LAUFF, ed.). Am. Ass. Adv. of Sc. Publ. 83. Wash. D.C. 2: 71-79.
- PRITCHARD, D. W. (1967). *What is an Estuary: Physical Viewpoint*. (En: *Estuaries*, G. H. LAUFF, ed.). Am. Ass. Adv. of Sc. Publ. 83. Wash. D.C. 1: 3-5.
- RINGUELET, R. A. (1962). *Ecología acudtica continental*. Eudeba. Bs. As. 138 págs.
- SVERDRUP, H. U.; M. W. JOHNSON; R. H. FLEMING (1961). *The Oceans. Their Physics, Chemistry and General Biology*. Prentice-Hall. Modern Asia Ed. Tokio. 1087 págs.