

CNEA-NT 10/85

REPUBLICA ARGENTINA
COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
Dependiente de la Presidencia de la Nación
DIRECCION DE RADIOISOTOPOS Y RADIACIONES

TRANSFERENCIA DE NUCLEIDOS DE LA FASE AGUA A LOS SEDIMENTOS DURANTE CICLOS HIDROLOGICOS NORMALES Y EXTRAORDINARIOS RIO PARANA DE LAS PALMAS

Estudio realizado en colaboración con el
Organismo Internacional de Energía Atómica
Contrato N° 3318/R1/RB

Investigador Científico Jefe
Héctor R. Gómez

Buenos Aires
1985

REPUBLICA ARGENTINA
COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
Dependiente de la Presidencia de la Nación
DIRECCION DE RADIOISOTOPOS Y RADIACIONES

TRANSFERENCIA DE NUCLEIDOS DE LA
FASE AGUA A LOS SEDIMENTOS DURANTE CICLOS
HIDROLOGICOS NORMALES Y EXTRAORDINARIOS
RIO PARANA DE LAS PALMAS

Estudio realizado en colaboración con el
Organismo Internacional de Energía Atómica
Contrato N° 3318/R1/RB

Investigador Científico Jefe
Héctor R. Gómez

Buenos Aires
1985

CONTRATO N° 3318/R1/RB

INSTITUCIONES E INVESTIGADORES PARTICIPANTES

GOMEZ, Héctor Rodolfo *

GILLEN, Ricardo José *

MAGGIO, Guillermo Eduardo *

HOPWOOD, Haroldo Juan **

ANGIOLINI, Fernando Ernesto ***

COHEN, Isaac Marcos *

PLA, Rita Rosa *

GRAIÑO, Jorge Guillermo *

DI CARLO, Roberto Oscar *

TRIPOLI, Carlos Rafael *

REY, Silvio Enrique *

KOPP, Ursula Irene *

COSTELLO, Edmundo Dante*

* COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA (CNEA)

** INSTITUTO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNICAS HIDRICAS (INCYTH)

*** INSTITUTO NACIONAL DE GEOCRONOLOGICA Y GEOLOGIA ISOTOPICA (INGEIS)

CONTENIDO

SECCION	PAGINA
Resumen.	1
Abstract	3
1.0.0.0 ANTECEDENTES	5
1.1.0.0 Antecedentes hidrológicos del Paraná de las Palmas durante el ciclo hidrológico 1982-1983 y programa de estudios comprometidos	5
1.2.0.0 De los sedimentos como vehículo de reducción o incremento de dosis a nivel de grupo crítico y regional	13
1.3.0.0 De los efluentes líquidos liberados y del régimen de descargas	15
2.0.0.0 HIDROLOGIA DE LA CUENCA INFERIOR: RIO PARANA, RIO PARANA DE LAS PALMAS Y RIO DE LA PLATA.	17
3.0.0.0 CARACTERISTICAS FISICOQUIMICAS DE LAS AGUAS DEL PARANA DE LAS PALMAS.	21
4.0.0.0 MECANISMOS NATURALES E INDUCIDOS DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS. TRANSPORTE EN SUSPENSION Y POR ACARREO. NAVEGACION Y DRAGADO.	23
4.1.0.0 Mecanismos de transporte de sedimentos. . .	23
4.2.0.0 Transporte en suspensión y por acarreo . . .	23
4.2.1.0 Método de investigación y control	23
4.2.2.0 Concentración de sedimentos en suspensión que pasan por Atucha y relación entre velocidades, sedimentación, transporte, etc.	25
5.0.0.0 DESCARGA DE EFLUENTES EN EL PARANA DE LAS PALMAS.	29
6.0.0.0 EXTRACCION DE MUESTRAS DE SUELOS O LECHO DEL RIO Y ANALISIS DE LA CONCENTRACION DE NUCLEIDOS EN DICHAS MUESTRAS.	33
6.1.0.0 Extractor de muestras (no alteradas) de sedimentos de fondo o suelos inundados . . .	33
6.2.0.0 Análisis de la concentración de nucleidos artificiales y naturales en las muestras de suelos inundados	33
6.3.0.0 Evaluación de los resultados parciales obtenidos hasta el presente.	37

7.0.0.0	COEFICIENTES DE DISTRIBUCION PARA SEDIMENTOS EN SUSPENSION.	
7.1.0.0	Extracción de muestras, equipos utilizados o medición en laboratorio	41
7.1.1.0	Ubicación y perioricidad de las muestras extraídas	41
7.1.2.0	Equipos de muestreo utilizados y extracción de muestras.	42
7.1.3.0	Mediciones en laboratorio y evaluación de los resultados	42
8.0.0.0	NAVEGACION. DRAGADO.	47
9.0.0.0	CONCLUSIONES	49
	ANEXO I.	53
	ANEXO II	55

R E S U M E N

En el ciclo hidrológico 1982-1983 los principales afluentes de la Cuenca del Plata registraron las mayores avenidas del siglo. Sobre la margen derecha del río Paraná de las Palmas están ubicadas las centrales nucleares en Atucha I y II. Los trabajos y estudios comprometidos debieron alterarse adaptando las investigaciones a las posibilidades y particulares condiciones hídricas verificadas.

La transferencia de nucleídos entre la fase agua y los sedimentos depende del tiempo de contacto, Ph , temperatura, así como de las características fisicoquímicas de los sedimentos. Durante una inundación se produce un hecho aparentemente paradójico ya que si bien el tiempo de contacto agua-sedimentos se reduce sobre el cauce del río, donde las velocidades son mayores, en cambio fuera del mismo, sobre áreas inundables, las aguas marcadas por las descargas de efluentes de la central nuclear, en virtud de su reducida movilidad, favorecen la infiltración en los suelos aluviales así como el intercambio con los sedimentos.

Las investigaciones realizadas particularmente para la fase uno o fase próxima a la descarga de efluentes líquidos (vinculada con el grupo crítico) permitieron comprobar en estas atípicas condiciones las características de la pluma o trayectoria de los residuos líquidos liberados, coeficientes de distribución y fijación o penetración de algunos nucleídos sobre los suelos del valle inundable para arribar a un balance o inventario final de nucleídos radiactivos incorporados a suelos y sedimentos localizados en las inmediaciones de Atucha y el curso del Paraná de las Palmas.

Se ejecutaron también determinaciones de coeficientes de distribución (K_d) de agua-sedimentos para distintos nucleídos a partir de muestras obtenidas en campaña y una evaluación de los antecedentes existentes relativos a coeficientes de dispersión (K_x , K_y , K_z) en el Paraná de las Palmas.

En una de las cuencas hídricas y aluviales más importantes del mundo, con un desarrollo energético del 60% de su potencial técnico y económicamente aprovechable y que a fin del presente siglo se elevará al 90% consideramos trascendente señalar las características preponderantemente temporales del intercambio de nucleídos entre las fases líquidas y sólidas.

Las avenidas extremas aún con baja concentración de sedimentos en suspensión o su contrapartida, los años con prolongadas sequías y alta concentración de sedimentos en suspensión definen paradójicamente niveles de transferencia de nucleídos, compatibles con la sensibilidad de medición o detección disponibles hasta el presente.

En años hidrológicos normales en cambio, resulta particularmente imposible detectar, la presencia de radionúclidos artificiales aún en las inmediaciones de la central nuclear o grupo crítico.

La potencia instalada de origen nuclear en la Cuenca del Plata es de 1000 MW_e (Central Nuclear en Atucha I y Central Nuclear en Embalse) mientras que la Central Nuclear en Atucha II está en la fase de construcción.

No escapa a nuestra consideración el haber omitido hasta aquí la des-sorción de los radionúclidos artificiales incorporados a los sedimentos frente a severas o prolongadas condiciones de lavado o bien un tratamiento más riguroso del problema a partir de la Ley de Freundlich u otra isoterma como la de Langmuir: en una próxima etapa con énfasis en la tarea de laboratorio, trataremos de profundizar estas investigaciones.

A B S T R A C T

Within the 1982-1983 hydrologic cycle, the most important affluents of the Cuenca del Plata, registered the greatest freshets of the century. Atucha I and Atucha II Nuclear Centrals are located on the right margin of the Paraná de las Palmas river. Works and studies previously fixed had to be altered and investigations were adapted to the possibilities and the particular hydric conditions verified.

The transfer of nuclides between water and sediments depends on the contact time, pH, temperature and other physical and chemical characteristics of the sediments as well. During a flood a paradoxical event takes place. On the bed of the river, where velocities are higher, water-sediments contact time becomes smaller. On the other hand, the waters labelled by the Nuclear Central effluent discharge with the sediments in outer areas, subject to the influence of favour the infiltration in alluvial soils, as well as the exchange floods, due to their little movility.

In these atypical conditions, the investigations carried out for phase 1, near to the discharge of liquid affluents (related to the critical group) made possible to prove the characteristics of the path of the liquid wastes released, the distribution coefficients and the fixation or penetrability of some nuclides in soils of the floody valley. In this manner, a final inventory of radioactive nuclides incorporated to soils and sediments from the neighbourhood of Atucha and the water-course of Paraná de las Palmas river is obtained.

Determinations of distribution coefficients: sediment-water (K_d), were also performed for some nuclides from samples obtained in the field, and an evaluation of the antecedents related to dispersion coefficients (K_x , K_y , K_z) in the Paraná de las Palmas river was made.

We consider transcendent to point out the predominantly temporary characteristics of the exchange of nuclides between solid and liquid phases in one of the most important hydric and alluvial basins of the world, with 60% energetic development of its technical and economically available potential, which will be increased to 90% at the end of the present century.

Levels of nuclide transfer compatible with the hitherto available detection or measurement sensitivity are defined, paradoxically, by: a) extreme freshets in spite of the low concentration of suspended sediments, or b) long droughts with high concentration of suspended sediments.

On the other hand, the detection of artificial radioisotopes turns out particularly impossible in normal hydrological years, even in the surroundings on the nuclear central or the critical group.

The power of nuclear origin installed in the Cuenca del Plata is 1000 Mw (Atucha I and Embalse Nuclear Centrals) while Atucha II nuclear central is in construction.

We realize that we have so far omitted the consideration of factors such as the desorption of artificial radioisotopes incorporated to the sediments in conditions of severe or prolonged washing; also a more rigorous treatment of the problem from the Freundlich law or other isotherms, as the Langmuir one. We shall try to go deep into this research in future experiments with special emphasis in laboratory works.

1.0.0.0 ANTECEDENTES

1.1.0.0 ANTECEDENTES HIDROLOGICOS DEL PARANA DE LAS PALMAS DURANTE EL CICLO HIDROLOGICO 1982-1983 Y PROGRAMA DE ESTUDIOS COMPROMETIDOS

La Cuenca del Plata sirve como drenaje de una superficie de $3,1 \times 10^6 \text{ Km}^2$.

El río Paraná de las Palmas es parte del Delta del Paraná y desemboca en el Río de la Plata. En su margen derecha están ubicadas las Centrales Nucleares en Atucha I y II.

En este tramo del Paraná de las Palmas, con definidas características aluviales y morfología de tipo meandros, el régimen hidrológico corresponde a la transición entre un sistema fluvial (río Paraná) y otro de mareas y acciones meteorológicas, particularmente vientos (Río de la Plata). Los caudales instantáneos prevalencientes fluctúan entre $2.500 \text{ m}^3/\text{s}$ y $6.000 \text{ m}^3/\text{s}$.

Durante el año hidrológico anterior se ha producido la mayor crecida histórica conocida en la Cuenca del Plata (ríos Paraná, Paraguay, Paraná de las Palmas, etc), tanto por los niveles y caudales registrados como por la duración de la misma. En Atucha se midió un gasto de $8.200 \text{ m}^3/\text{s}$ (medio de $Q_m \approx 3.000 \text{ m}^3/\text{s}$), así como mínimas concentraciones de sedimentos en suspensión. El máximo maximorum (13-7-83) fue del orden de los 10.000 m^3 para una altura $h = 5,29 \text{ m}$. En el Anexo I se exponen los aforos realizados por el Instituto Nacional de Ciencia y Técnicas Hídricas los días 13 y 14 de abril de 1983.

Por lo expuesto, se intensificaron las investigaciones en campaña de sectores adyacentes al canal de descarga (valle inundable) reduciéndose al mínimo compatible con estas circunstancias la investigación sobre el cauce del río y en sectores alejados del punto de descarga.

Durante esta inundación, cuyo inicio se produjo en el mes de enero concluyendo en el primer mes del año 1984 y debido a las características físicas del canal de descarga, una parte de los nucleídos periódicamente liberados se fijaron en los suelos del valle inundable adyacente, habiéndose iniciado entonces un programa de muestreo de suelos y determinación de concentraciones de algunos de los principales radioisótopos artificiales fijados, en función de la profundidad o penetración en suelos.

La concentración de sedimentos en suspensión (50 ppm) en esta etapa permitió efectuar estudios en el canal de descarga en condiciones naturales que si bien no son las prevalecientes permitirían ejecutar extrapolaciones a situaciones críticas en el río Paraná de las Palmas, tales como muy reducidos caudales y elevadas concentraciones de sedimentos en suspensión. Esta sería una condición en la que los sedimentos en suspensión fijarían mayores proporciones de nucleídos.

Las experiencias de laboratorio realizadas sirvieron de complemento a los estudios de campaña adaptando las mismas a estas circunstanciales condiciones hidrológicas.

En las Figs. 1 y 2 se exponen los planos de localización de las Centrales Nucleares en Atucha I y II. En la primera figura se indica la localización de las centrales nucleares en el marco del Delta del Paraná señalándose las progresivas del Paraná de las Palmas así como los principales accidentes geográficos y el Río de la Plata sobre el cual ha sido trazado el canal Mitre, salida y acceso artificial de los buques de ultramar o cabotaje que pasan por Atucha. En la Fig. 2 se aprecia la localización de Atucha en relación con el grupo crítico.

En todos los casos se expone la ubicación de las áreas seleccionadas para extraer muestras o efectuar mediciones directas siguiendo la orientación establecida por la guía SG-S6 (OIEA) en su versión o corrección última.

Se expone en la Fig. 3 dos vistas de los canales de carga y descarga de la Central Nuclear en Atucha I. La primera fotografía corresponde a un nivel de 4 m (nivel medio 2 m) mientras que la segunda a un valor cercano al máximo registro de inundación que fue de 5,29 m. En esta última fotografía pueden apreciarse las isotermas correspondientes al día de medición que permiten visualizar las trayectorias principales y secundarias de los nucleídos liberados durante la inundación que cubrió la margen izquierda y derecha del río Paraná de las Palmas.

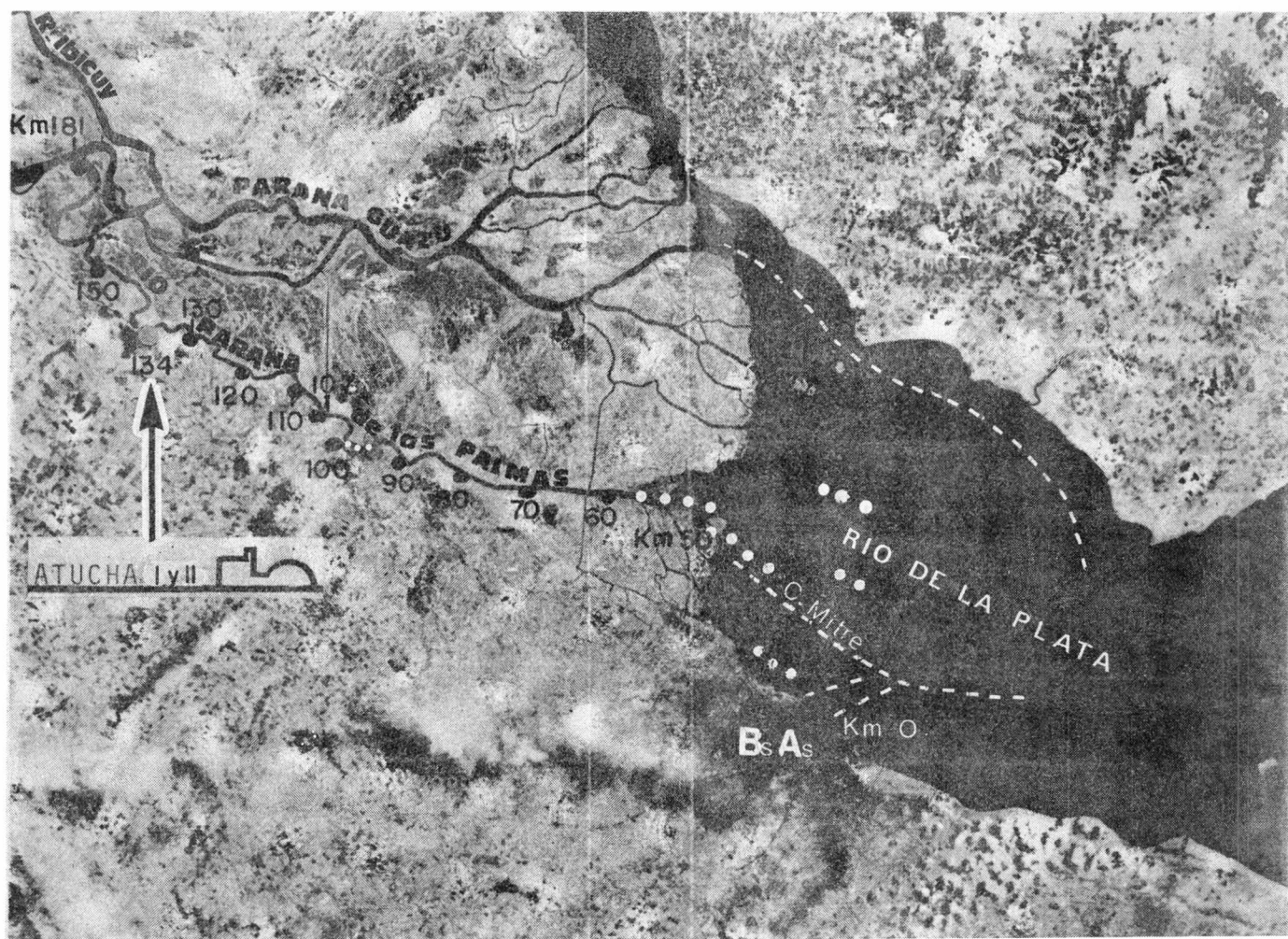
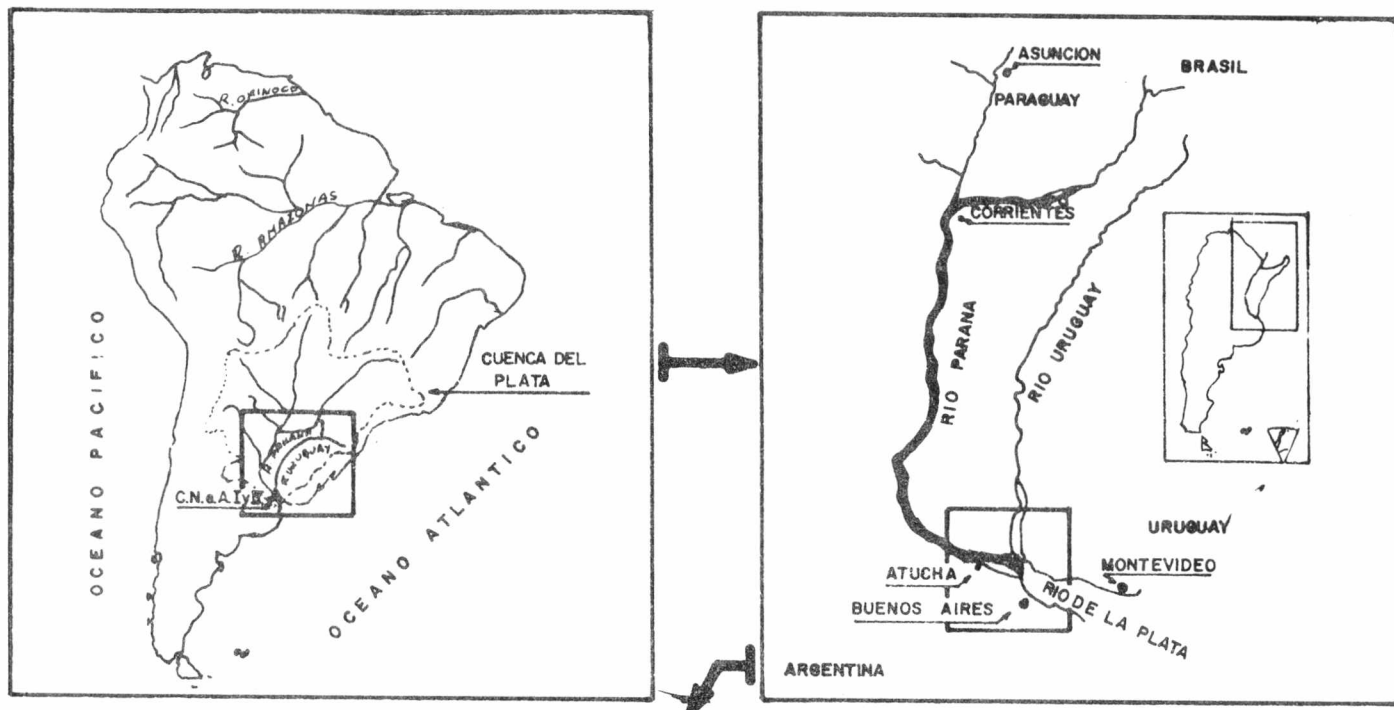


Fig. 1 Localización de las Centrales Nucleares en Atucha I y II.
Location of Atucha I and II Nuclear Power Stations.

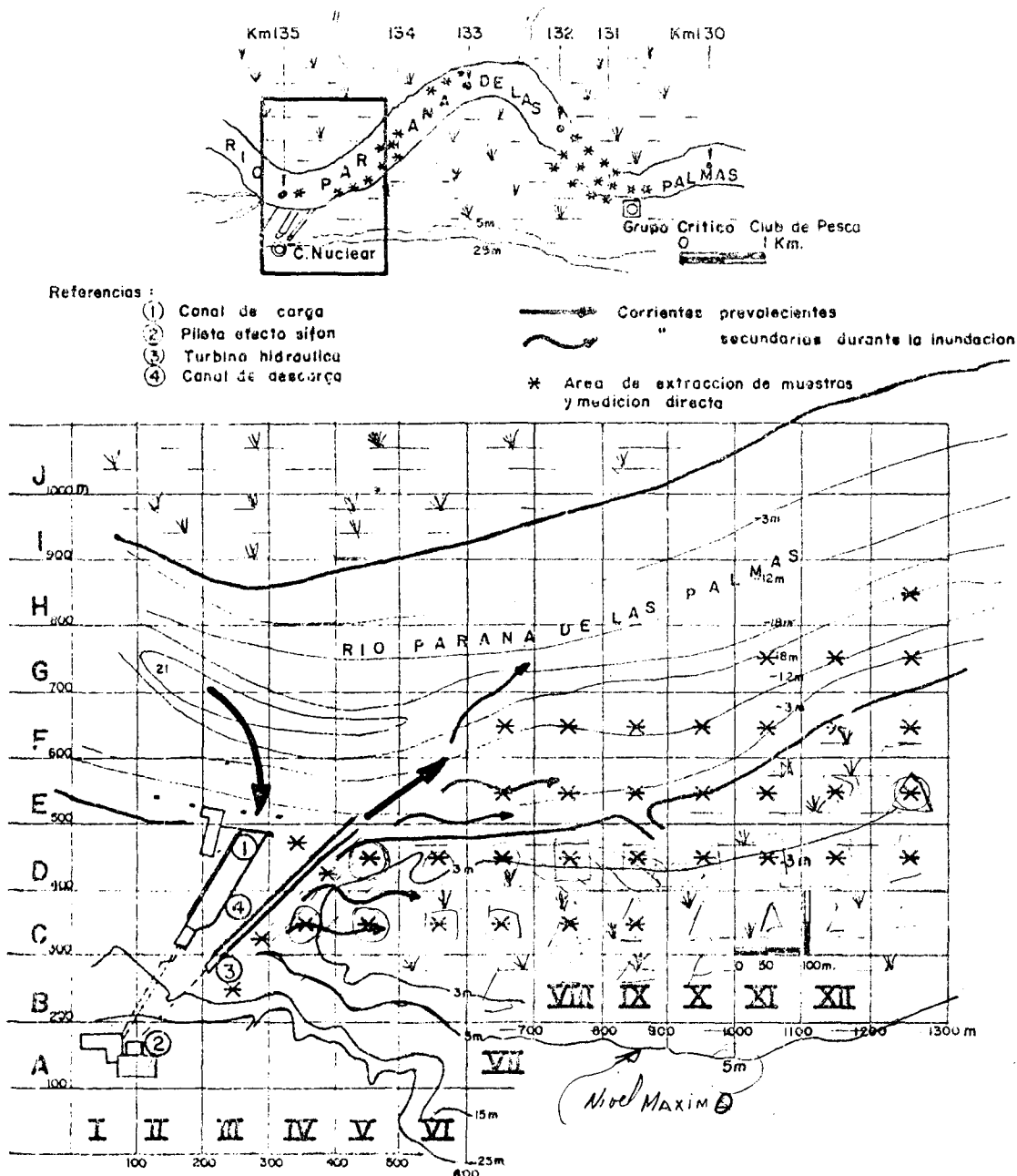
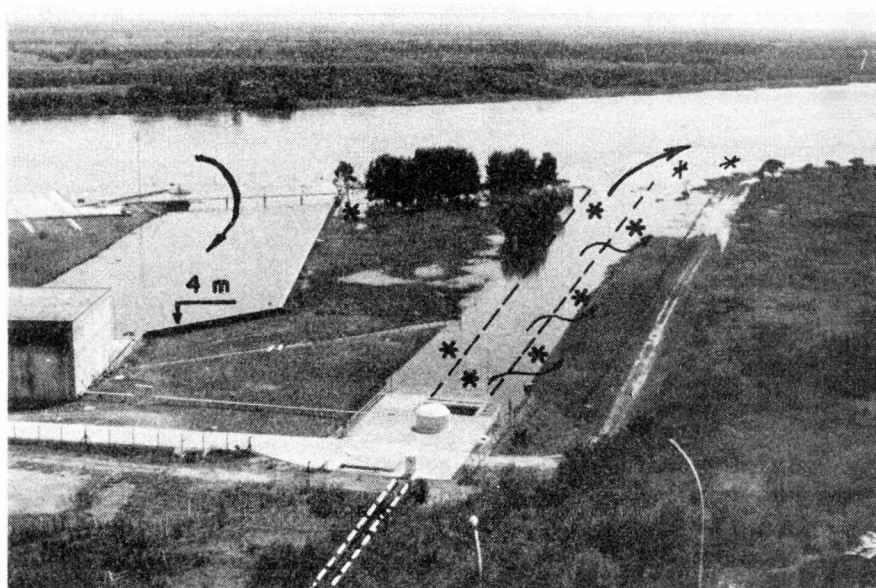


Fig. 2 Localización de las Centrales Nucleares en Atucha I y II para la fase 1 (Guía SG-S6 OIEA) con indicación sobre áreas de extracción de muestras o medición directa (*), grupo crítico y áreas inundadas en 1983.

Location of Atucha I and II Nuclear Power Stations for phase 1 (SG-S6 OIEA guide) indicating sample extraction or direct measurement areas, critical group and flooded areas during 1983.



Referencias

* Area de extracción de muestras de agua, sedimento y suelos (Fig. 2)

➤ Líneas de flujo principal.

⤿ Secundarias

References

* Area of extraction of water, sediment and soil samples (Fig. 2)

➤ Main flow lines.

⤿ Secondary lines.

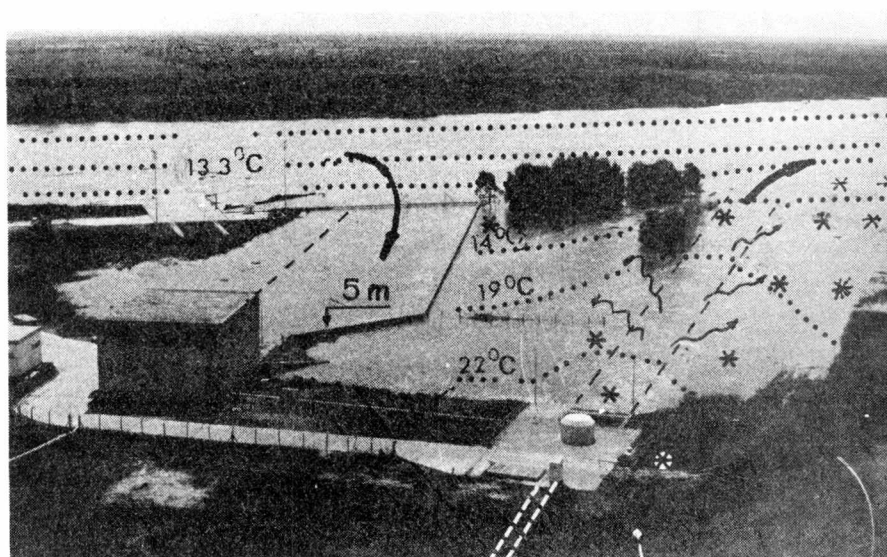


Fig. 3 Canales de carga y descarga de agua para refrigeración y efluentes líquidos durante dos etapas de la inundación.

Canals of charge and discharge of water for refrigeration and liquid effluents during two stages of the flood.

1.2.0.0 DE LOS SEDIMENTOS COMO VEHICULOS DE REDUCCION O INCREMENTO DE DOSIS A NIVEL DE GRUPO CRITICO Y REGIONAL.

Los sedimentos, paradójicamente, desempeñan un doble papel en la evaluación de las consecuencias radiológicas resultantes de efluentes líquidos liberados por las centrales nucleares (1).

La sorción y otros mecanismos de fijación de nucleídos por parte de fracción arcilla-limo, reducen las dosis comprometidas a partir de tomas de agua para abastecimiento de la población; en cambio, incrementan la dosis de grupos de población si se tiene en cuenta la ingestión de especies acuáticas de la cadena alimentaria o aumento de exposición por manipulación y contacto directo derivado de la recreación en playas o litoral fluvial.

El tritio (H-3) de origen natural o artificial contribuye preponderantemente a conformar las dosis comprometidas y por ser un isótopo natural presente en el agua, su intercambio con los sedimentos es nulo o muy reducido.

Entre los nucleídos de interés radiosanitario, deben considerarse aquellos que intercambian o son fijados y eventualmente liberados de su soporte por procesos físicos, químicos o biológicos.

En general y para evaluar dosis colectivas por usos consuntivos (bebida, lavado de comestibles, etc), es racional no tener en cuenta la acción de los sedimentos en virtud de los efectos de reducción de dosis antes mencionados, así como de prudentes y conservadoras hipótesis de evaluación.

En cambio, si el agua es utilizada para riego o si los sedimentos son incorporados a peces u otros organismos de la cadena biológica, es necesario y de interés, su estudio.

Más allá de estos usos es necesario, y conceptualmente recomendable, analizar el papel desempeñado por los sedimentos discriminando aspectos temporales y espaciales, razón por la cual se deben distinguir:

- Fase cercana (fase primera): El ámbito queda aquí reducido a unos pocos kilómetros medidos a partir de la descarga en el río; la descarga no alcanza generalmente condiciones de equilibrio u homogénea distribución con la masa líquida transportada por el río antes de llegar a la sección que define al grupo crítico. Por lo expuesto, correspondería aquí analizar la pluma de dispersión en el espacio considerando las tres componentes (x, y, z), así como los efectos temporales o tiempo de tránsito y, eventualmente, alteraciones en la temperatura del agua producida por la descarga. (Fig. 2). La fase cercana o primera está condicionada por las características físicas del canal de descarga así como las hi-

drodinámicas y morfológicas del río Paraná de las Palmas y su cauce.

Fase alejada y efectos a largo plazo (fases segunda y tercera): Aquí se determinan, calculan o asumen condiciones de equilibrio, homogeneidad y mezclado completo de la pluma de descarga en el medio o aguas superficiales analizadas (río Paraná de las Palmas y posteriormente Río de la Plata).

La fase segunda comenzaría en la sección del río Paraná de las Palmas donde se alcanza el mezclado completo de los nucleidos liberados a partir de la descarga.

Esta sección no está definida aún, y siendo independiente del tipo de descarga, está bajo la influencia del caudal y velocidades prevalecientes durante la liberación de nucleidos.

A partir de Atucha y hasta la desembocadura del Paraná de las Palmas en el Río de la Plata prevalece el transporte en suspensión, la sedimentación y erosión son muy reducidas. En cambio, la sedimentación y saltación son los mecanismos de transporte de sedimentos más activos en el Río de la Plata.

En la Fig. 1 y para las fases segunda y tercera se exponen los lugares seleccionados para extraer muestras y efectuar mediciones directas. Los sectores donde se intensificarán estos estudios han sido seleccionados en torno al Km 100 y 50 del río Paraná de las Palmas y otros tramos del Río de la Plata, en particular el Canal Mitre y bancos adyacentes.

1.3.0.0 DE LOS EFLUENTES LIQUIDOS LIBERADOS Y EL REGIMEN DE DESCARGAS

Las descargas regulares o en condiciones accidentales de efluentes que contienen radionucleidos procedentes de la fisión o activación nuclear, pueden ser liberados a cursos de agua por intermedio del canal de salida de agua para refrigeración cuando no superan determinados límites.

Los caudales o gastos requeridos para refrigerar centrales nucleares funcionando en estado de régimen y en circuito abierto, están comprendidos entre $0,050 \text{ m}^3/\text{s MW}_e$ y $0,030 \text{ m}^3/\text{s MW}_e$ para saltos térmicos que varían entre 7°C y 15°C , respectivamente.

Con la central fuera de servicio, los caudales efluentes de refrigeración asegurada se reducen a menos del 10% del mínimo antes mencionado y los requerimientos de agua se reducen en función del lapso transcurrido desde el fin de la operación de la central nuclear.

La secuencia de descarga así como actividades o concentraciones máximas de nucleidos en los efluentes están limitadas por las normas fijadas por autoridades nacionales competentes y de licenciamiento de centrales nucleares.

Los límites de actividad descargada al río están referidos a períodos diarios, semanales, mensuales y anuales y antes de efectuar una liberación se procede a medir la concentración de distintos nucleidos y el volumen respectivo.

Los radioisótopos naturales tales como el K^{40} y otros de las familias del uranio y del torio están presentes en los sedimentos. Las concentraciones son variables en el espacio y el tiempo.

Al egresar de la central nuclear los sedimentos en suspensión, por canales y tuberías destinadas al agua de refrigeración, son marcados durante los períodos de descarga. Cuando, como en el caso de Atucha, la longitud de las cañerías y canales de descarga es significativa, cabe, analizar en esta instancia la interfase agua-sedimentos ya que se cuenta con niveles de detección y medición compatibles con las actividades presentes en la fase acuosa y en los sedimentos.

En esta segunda etapa, los nucleidos con mayores posibilidades de medición, son: Co^{60} , Cs^{137} , Sr^{90} , Cr^{51} .

Cuando los nucleídos liberados ingresan al río Paraná de las Palmas y luego al Río de la Plata, las posibilidades de detección se reducen considerablemente en virtud de las elevadas diluciones experimentadas, comprendidas entre caudales "instantáneos" que históricamente han variado entre $1.600 \text{ m}^3/\text{s}$ y $11.000 \text{ m}^3/\text{s}$ (julio de 1983). En este caso para efectuar determinaciones "in situ", se requiere la implementación de sistemáticas campañas de medición, en cuya planificación se haya tenido en cuenta la posible existencia de lugares donde presumiblemente la concentración de nucleídos en sedimentos es apreciable y significativa o bien circunstancias hídricas desfavorables, tales como bajos caudales y elevadas concentraciones de sedimentos en suspensión.

Durante esta avenida que inundó el valle adyacente al lecho del río en el cual está inserto el canal de descarga a cielo abierto, las trayectorias de los efluentes cambiaron sensiblemente, como puede apreciarse en la Fig. 2 y fotografías aquí expuestas. La fase acuosa y los sedimentos marcados en las periódicas descargas por efecto de la mayor temperatura y las corrientes secundarias se desplazaron hacia el valle inundado. El tiempo de contacto agua-sedimentos en suspensión y sedimentos de los suelos aumenta fijándose los nucleídos o penetrando en dichos suelos.

Los vegetales que abundan en el valle también fijan parte de los nucleídos, razón por la que también fueron objeto de análisis cuando las aguas descendieron a niveles normales.

2.0.0.0 HIDROLOGIA DE LA CUENCA INFERIOR. RIO PARANA,
RIO PARANA DE LAS PALMAS Y RIO DE LA PLATA.
(2) (3) (4) (5)

El río Paraná de las Palmas se bifurca del cauce madre del Paraná en la progresiva Km 181 mientras que las centrales nucleares están ubicadas en el km 134, distancias estas, contadas a partir del Km 0 en Buenos Aires. Fig. 1.

En virtud de la baja profundidad del Río de la Plata no se generan mareas; existe una definida propagación de la marea oceánica que es de desigualdades diurnas.

La amplitud media mensual de mareas en Buenos Aires es del orden de 0,90 m en diciembre y enero, mientras que los mínimos valores se reducen a 0,75 m y se registran en junio y julio. En Atucha, estos valores se reducen a la tercera parte.

La descarga anual del Paraná de las Palmas es de $12,5 \times 10^{10} \text{ m}^3$ y la del Río de la Plata es de $75 \times 10^{10} \text{ m}^3$. Estos valores corresponderían a caudales instantáneos de $4.000 \text{ m}^3/\text{s}$ y $23.000 \text{ m}^3/\text{s}$ respectivamente.

Los vientos producen sobre el Río de la Plata una fuerza de corte sobre la superficie del agua muy importante. Las crecientes máximas surgen a partir de los vientos que soplan del S-SE y las máximas bajantes por vientos del N.

Vientos del SE, con velocidades comprendidas entre 20 y 50 Km/h, incrementarán niveles de agua entre 0,30 m y 0,96 m aproximadamente; en cambio, cuando el viento sopla del cuadrante N es doble apreciar descensos de, por ejemplo, 0,30m para una velocidad de 20 Km/h. Estos valores, solamente expuestos con fines de orientación, suponen una persistencia de los vientos suficientemente prolongada.

Vientos y mareas están por lo tanto íntimamente vinculados, resultando conveniente el tratamiento unificado de ambos; los vientos modifican trayectorias de corrientes, amplitud de mareas, etc.

En el Río Paraná de las Palmas, el efecto de estos factores astronómicos y meteorológicos es atenuado por las características del cauce. Atucha está en la plena transición de un régimen fluvial y otro de mareas y acciones meteorológicas propagadas desde el Río de la Plata. Mientras en este último río existe una definida inversión del sentido de la corriente cada seis horas, en Atucha sólo por excepción podría verificarse este fenómeno ya que predomina la componente fluvial sobre la de mareas.

La incidencia de estas variantes hidrométricas sobre el transporte de sedimentos, así como las posibilidades de intercambio de fases (líquido-sólido, sólido-líquido), son muy importantes.

En la Fig. 4 se exponen las alturas, pendientes superficiales y caudales en el río Paraná de las Palmas (sección Atucha) en función del tiempo. Este aforo se realizó en un día en que se registraban bajos niveles de agua. Se advierte que la pendiente superficial llega a ser nula durante breves instantes, sin que puedan generarse definidas tendencias a la inversión del sentido de la corriente.

En un día con niveles medios o normales, la altura del agua en Atucha y Buenos Aires (Río de la Plata) es más regular: se expone en el esquema de la Fig. 5 las oscilaciones diarias en ambos emplazamientos, así como una interpretación de la importancia relativa de la sedimentación y el transporte de sedimentos en suspensión en función del tiempo.

Durante el año 1983 se ha producido la mayor crecida extraordinaria registrada en la Cuenca del Plata con niveles y caudales que superaron todos los valores conocidos en la mayoría de las estaciones hidrométricas.

Esta avenida tiene además características atípicas particularmente por su prolongación en el tiempo, que superó los doce meses.

En Atucha, la pendiente superficial ha estado comprendida entre 3,5 cm/Km y 4,5 cm/Km y caudales comprendidos entre 10.000 y 11.000 m/s.

En el Anexo I se expone un aforo realizado por el Instituto Nacional de Ciencia y Técnicas Hídricas (INCYTH) en el mes de abril de 1983. Las mediciones se efectuaron sobre el cauce principal de los dos más importantes ríos: Paraná de las Palmas y Paraná Guazú. Los niveles en Atucha están expuestos en la Fig. que acompaña dicho Anexo.

Estas particulares condiciones impulsaron a cambiar los planes de trabajo primitivamente elaborados, anulándose algunas experiencias previstas en áreas alejadas de la central nuclear. En cambio, se intensificaron los estudios en sectores cercanos a la descarga de efluentes y, particularmente, sobre el valle inundado donde las aguas registraron baja movilidad, permitiendo así obtener muestras de sedimentos y agua con concentración compatibles con los límites de medición disponibles.

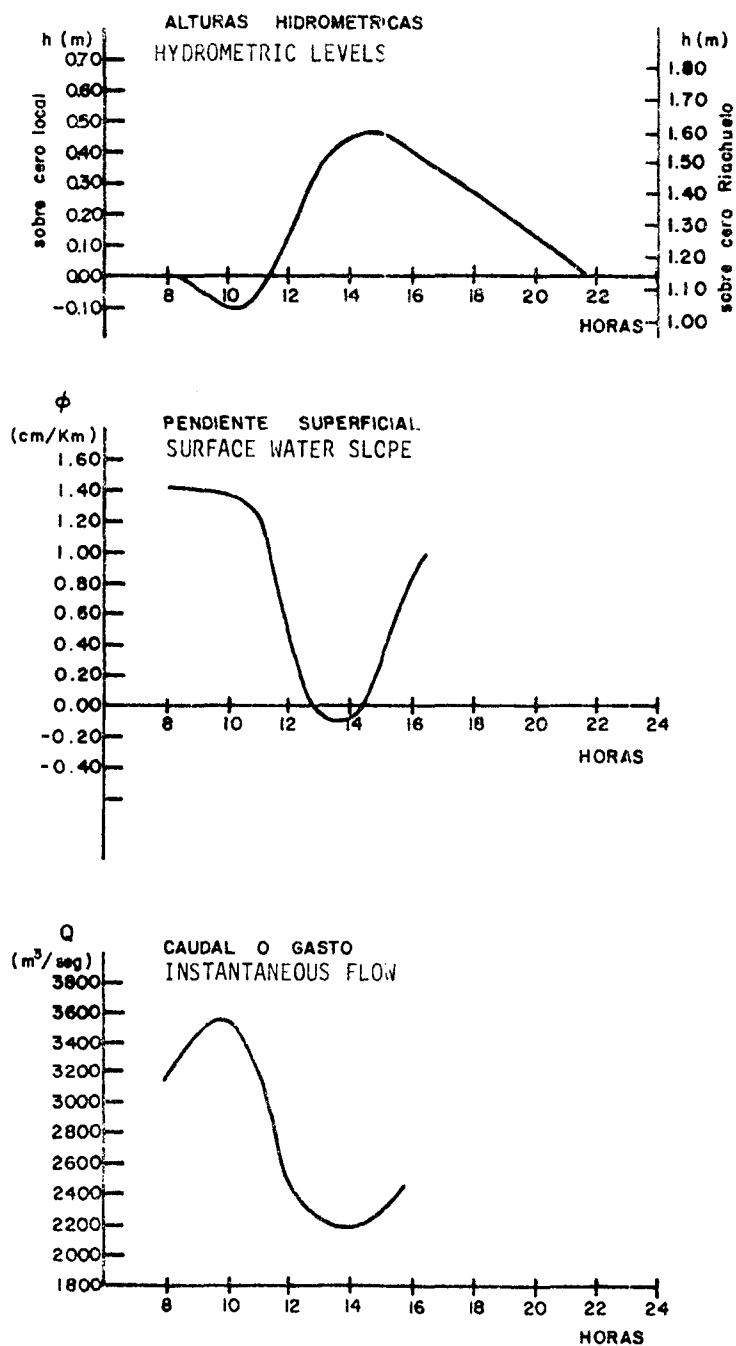
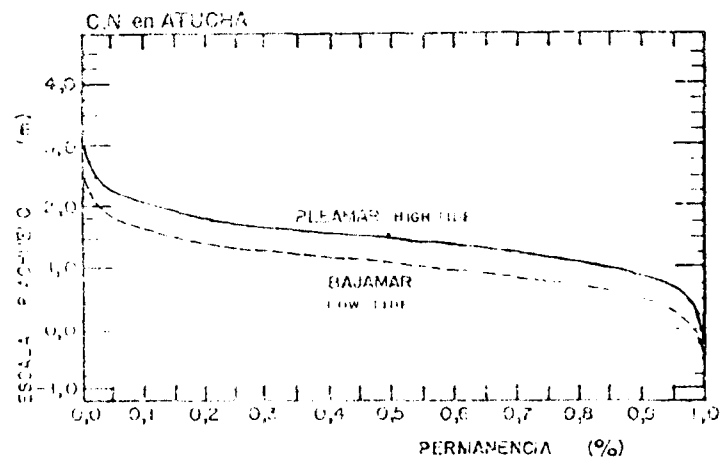


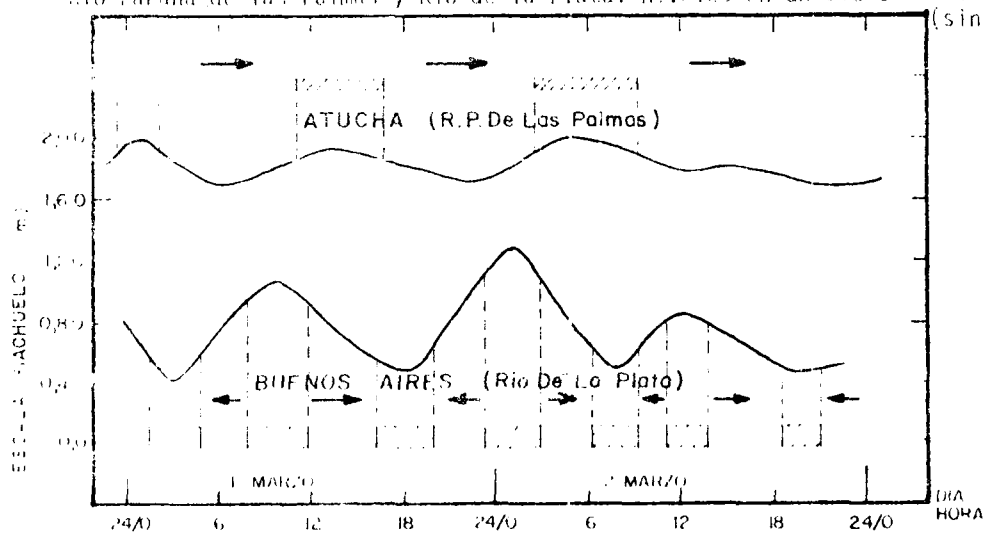
Fig. 4 Alturas hidrométricas, pendiente superficial y caudal.

Hydrometric levels, surface water slope and instantaneous flow.

Río Paraná de las Palmas. frecuencias de niveles diarios en pleamar y bajamar
Paraná de las Palmas river. frequency of daily levels in high tide and low tide



Río Paraná de las Palmas y Río de la Plata. niveles en un día característico.
(sin vientos)



REFERENCIAS

- 1. "Previole" sedimentación
- 2. "Previole" transporte (La flecha indica dirección y sentido)

Fig. 1. Frecuencia de niveles de agua para la sección Atucha del río Paraná de las Palmas y registro típico de niveles para el Río de la Plata (Bs.As.) y río Paraná de las Palmas (Atucha) en un día sin vientos.

frequency of water levels for the Atucha section of Paraná de las Palmas river and typical registration of levels for the Río de la Plata (Bs.As.) and Paraná de las Palmas river (Atucha) in a day without wind.

3.0.0.0 CARACTERISTICAS FISICOQUIMICAS DE LAS AGUAS DEL PARANA DE LAS PALMAS.

Las sustancias disueltas en las aguas del Paraná de las Palmas bajo la forma molecular o iónica son expuestas en la Tabla I. Los datos han sido obtenidos de una serie de mediciones realizadas entre 1976 y 1983 incluyéndose las ejecutadas para este estudio. Los principales cationes y otros valores fisicoquímicos son expuestos bajo la forma de concentraciones máximas y mínimas.

En la Tabla II se exponen las determinaciones de elementos a nivel de trazas efectuadas para este estudio, mientras que en la Fig. 6 y, en virtud de haberse efectuado durante cinco años sistemáticas determinaciones, se representan las temperaturas medias mensuales ambientales. Si bien el período de registro y el número de años no concuerdan en ambos casos, interpretamos que los resultados son representativos aún con estas condiciones.

En todos los valores hasta aquí consignados no se detectan concentraciones significativas de contaminantes orgánicos o inorgánicos. Aguas arriba de Atucha, la ciudad de Baradero posee una planta de tratamiento de desagües cloacales. Teniendo en cuenta los mayores centros urbanos e industriales cercanos a las centrales nucleares, las concentraciones de contaminantes inorgánicos, biológicos y orgánicos, se encuentran en las proximidades del Km 100 y cercanías del los arroyos de la Cruz y Pesquería. (2). Las principales alteraciones detectadas en esos lugares corresponden a $\text{SO}_4^{=}$; Cl^- , NH_4^+ ; conductibilidad, alcalinidad total, éter etílico, etc (16).

En el área antes definida las mayores concentraciones de tritio (H^3) medidas en el Paraná de las Palmas son $18,4 \pm 0,7$ UT sin corresponder este valor a un sistemático muestreo relacionado con las descargas de la central nuclear.

Dado el importante tráfico fluvial de buques que transportan petróleo y otros hidrocarburos por el Paraná de Palmas, así como debido a la existencia de un puerto de carga y descarga en el Km 120 y una destilería (Km 97), hemos incluido este contaminante en el presente estudio sin haberse efectuado hasta el presente determinaciones en el campo, debido a las atípicas características del presente ciclo hidrológico.

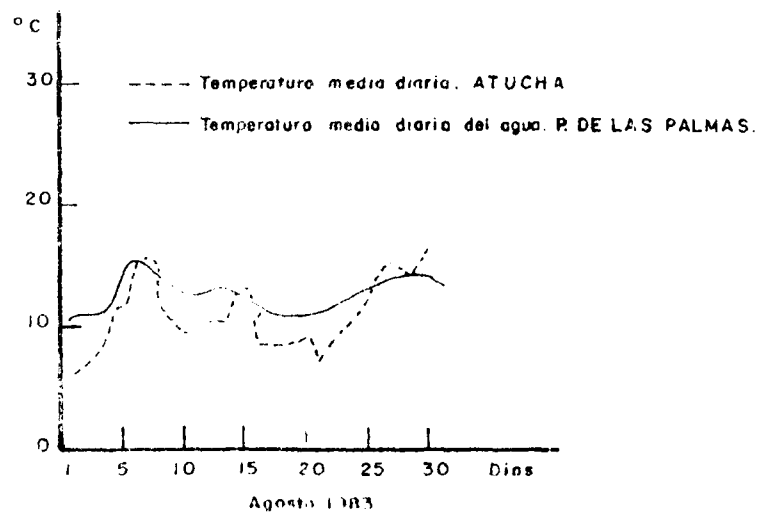
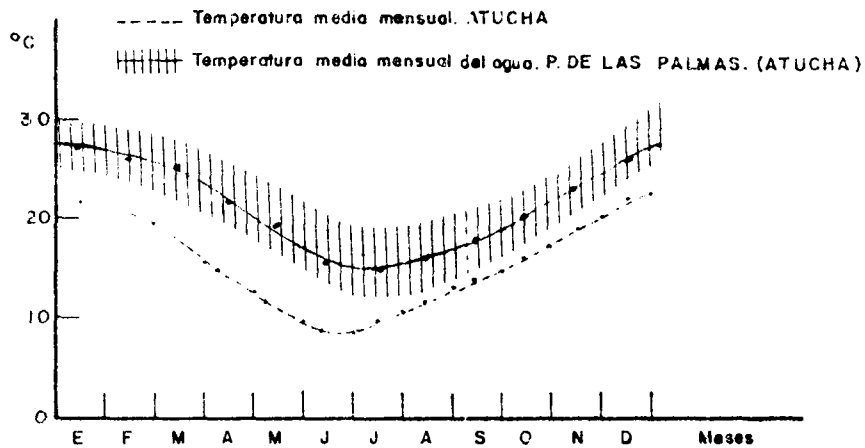


Fig. 6 Temperatura media diaria y mensual del río Paraná de las Palmas.
 Daily and monthly temperatures of the Paraná de las Palmas river.

4.0.0.0 MECANISMOS NATURALES E INDUCIDOS DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS. TRANSPORTE EN SUSPENSION Y POR ACARREO. NAVEGACION Y DRAGADO.

4.1.0.0 MECANISMOS DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Los sedimentos en ríos aluviales son transportados:

- En suspensión.
- Por acarreo (resbalamiento, rodamiento y pequeñas saltaciones)
- Por intercambio entre el lecho y la corriente (erosión) y entre la corriente y el lecho (sedimentación).

El transporte en suspensión predomina en toda la cuenca media y baja. El transporte por acarreo es sólo significativo en toda la cuenca media. En Atucha y en el Río de la Plata es mínimo o muy reducido. Este tipo de movimiento se inicia cuando la tensión tangencial en la interfase (τ) es igual o superior a la tensión tangencial crítica (τ_0).

Cuando el lecho del río está cubierto por dunas o antidunas de arena, el transporte por acarreo suele ser significativo.

4.2.0.0 TRANSPORTE EN SUSPENSION Y POR ACARREO.

4.2.1.0 Métodos de investigación y control.

Para pronosticar cambios morfológicos o comprobar la estabilidad y permanencia de relevantes aspectos topográficos, resulta trascendente el análisis cronológico de la evolución de cauces, márgenes erosionadas y sectores del río donde prevalece la decantación y sedimentación.

En el río Paraná de las Palmas y en las inmediaciones de Atucha el curso es sinuoso, con típicos meandros y una margen derecha estabilizada, mientras que en la margen izquierda es inundable durante las crecidas extraordinarias.

Las centrales nucleares están ubicadas sobre la barranca de 25 metros de altura de la margen derecha. Estas barrancas están constituidas por sedimentos de tipo arcilla-limo y arena, con elevada compactación y cementado, en algunos casos, con carbonato de calcio. La estabilidad del cauce en el área de las centrales nucleares y la tendencia, aguas abajo, al curso rectilíneo, se debe, probablemente, a ese control estructural de los depósitos subyacentes.

Debajo del pie de la barranca se suelen también encontrar bancos de materiales calcáreos o tosca con elevada compactación.

El río Paraná de las Palmas, 80 Km aguas abajo de Atucha, desemboca en el Río de la Plata (Fig. 1) considerado el río más ancho del mundo. La velocidad del agua se reduce y comienza una intensa sedimentación.

En los bancos del Río de la Plata dicha sedimentación alcanza a 0,30 m/siglo, mientras que en los canales artificiales o naturales el promedio es de 0,30 m/año debido a la menor velocidad del agua y dirección no concordante con la dirección de la corriente prevaleciente.

En el río Paraná se efectuaron estudios para cuantificar el transporte por acarreo utilizando técnicas nucleares (2) y técnicas basadas en la medición periódica del desplazamiento de valles o crestas de dunas mediante el uso de sondas ecográficas (5). También se evaluó este transporte a partir de fórmulas empíricas y parámetros no dimensionales (Mayer Peter y Muller, Schoklistsh, etc.) (6).

Las experiencias y estudios antes mencionado se realizaron en el Paraná Medio, es decir, a distancias comprendidas entre 600 y 1.200 Km de la desembocadura en el Río de la Plata. En Atucha y en el Río de la Plata estas técnicas no serían aplicables ya que el transporte por acarreo es muy reducido.

En el río Paraná de las Palmas se efectuaron también estudios con trazadores radiactivos (I-131) destinados determinar factores de dispersión, es decir, evaluar la capacidad autodepuradora del río (7) mientras que en el Río de la Plata (8) se marcaron los sedimentos naturales con Ag^{110m} para evaluar la movilidad de bancos y seleccionar la traza más conveniente del canal Emilio Mitre, salida artificial al océano de las naves que pasan por el río Paraná de las Palmas.

Los resultados de las experiencias mencionadas han sido de utilidad en estas investigaciones para cuantificar transporte de sedimentos, seleccionar áreas de muestreo, etc.

Por todo lo aquí expuesto, consideramos oportuno sintetizar y dar definiciones para condiciones de contorno o entrada en modelos matemáticos:

- En condiciones normales el transporte por acarreo es muy reducido en el Paraná de las Palmas.
- En condiciones normales prevalece el transporte en suspensión.
- En condiciones normales la erosión o sedimentación en el Paraná de las Palmas es muy reducida, en el cauce principal. En cambio, sobre las márgenes del cauce ($1\text{ m} \leq h \leq 3\text{ m}$ para Atucha) pueden verificarse importantes efectos de erosión o sedimentación debido entre otras causas a la acción inducida por el paso de buques.

En el Río de la Plata prevalece fuera de canales la sedimentación y saltación. En el tramo del canal Emilio Mitre comprendido entre las progresivas Km 25 y Km 57 decantan gran parte de los sedimentos que pasan por Atucha en suspensión.

4.2.2.0 Concentración de sedimentos en suspensión que pasan por Atucha y relación entre velocidades, sedimentación, transporte etc.

Partiendo de correlaciones efectuadas con otras estaciones de aforo (10) en parte verificadas en la sección Atucha y además de mediciones directas ejecutadas por técnicos de la Central Nuclear en Atucha I y del Departamento de Aplicaciones Tecnológicas se ha definido en la Fig. 7 la relación de la concentración de sedimentos en suspensión para dos profundidades (0,50 m y 0,30 m) incorporándose también la relación entre sedimentos totales, sedimentos que decantan en 24 horas y residuos por evaporación total.

En la Fig. 8 se incorpora la variación temporal de concentraciones de sedimentos en suspensión (medias mensuales) así como los caudales medios mensuales según un censo de once años de registros que no incluyen los últimos tres años. Se incorporan también los percentiles 10% y 90%.

En la Fig. 9 se expone el Diagrama de Hjulström, válido para la sección Atucha, donde se indican velocidades medias en el canal de toma de agua para refrigeración, cauce principal (condiciones normales) y valle inundable (1983).

El Instituto Nacional de Ciencia y Técnicas Hídricas (INCYTH) ha participado y asesorado en la mayoría de los estudios de campaña realizados. (15).

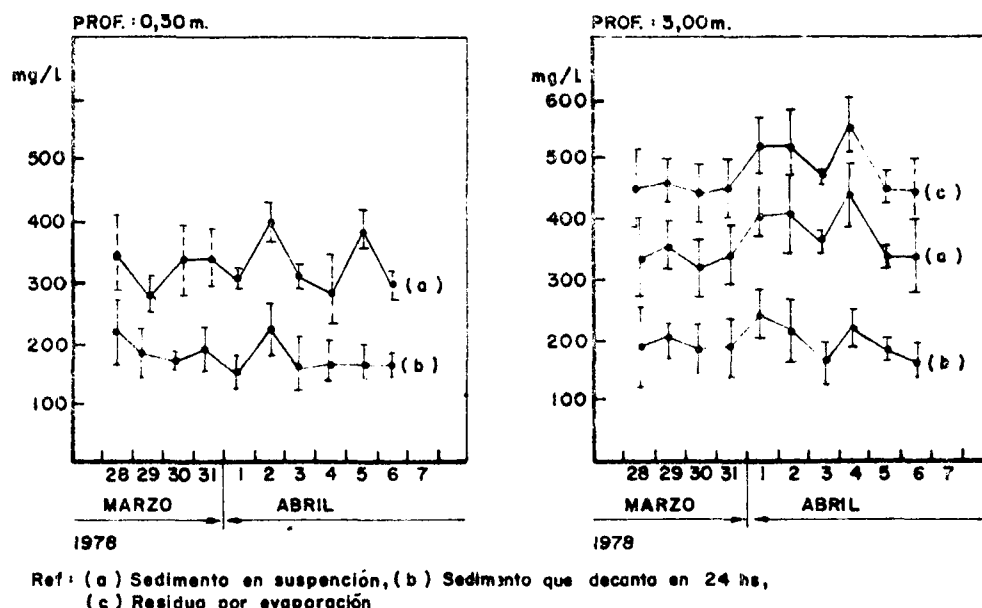


Fig. 4 Concentración de sedimentos en suspensión, que decantan en 24 hs. y residuos por evaporación en función de la profundidad.

Concentration of sediments in suspension, which decant within 24 h and residues by evaporation as function of the deepness.

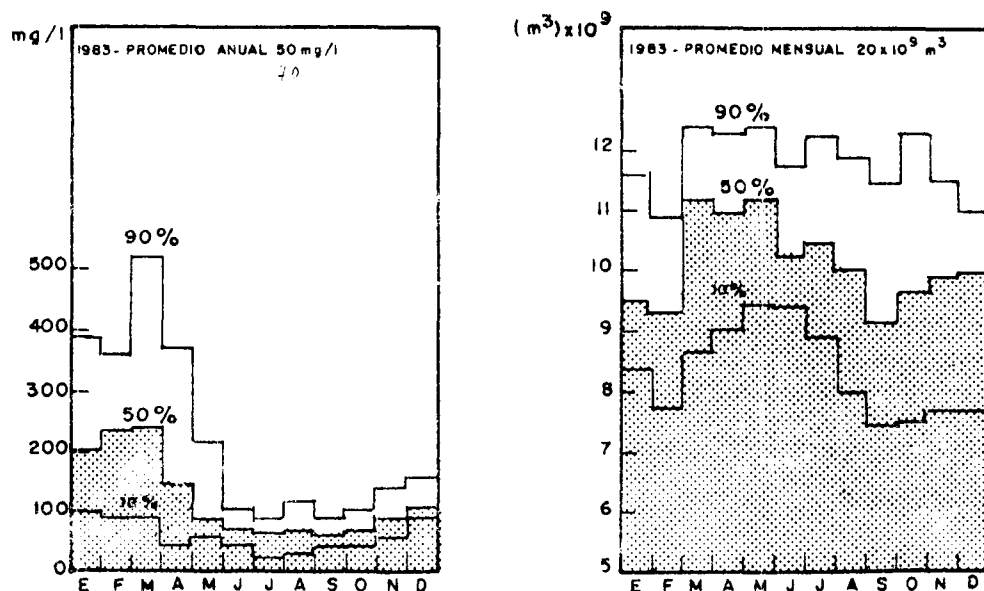


Fig. 5 Concentración de sedimentos en suspensión y caudales no superados, para 11 años de registro. Percentiles 10%, 50% y 90%.

Concentration of suspended sediments and non-exceeding flows, for 11 year register; 10%, 50% and 90% percentiles.

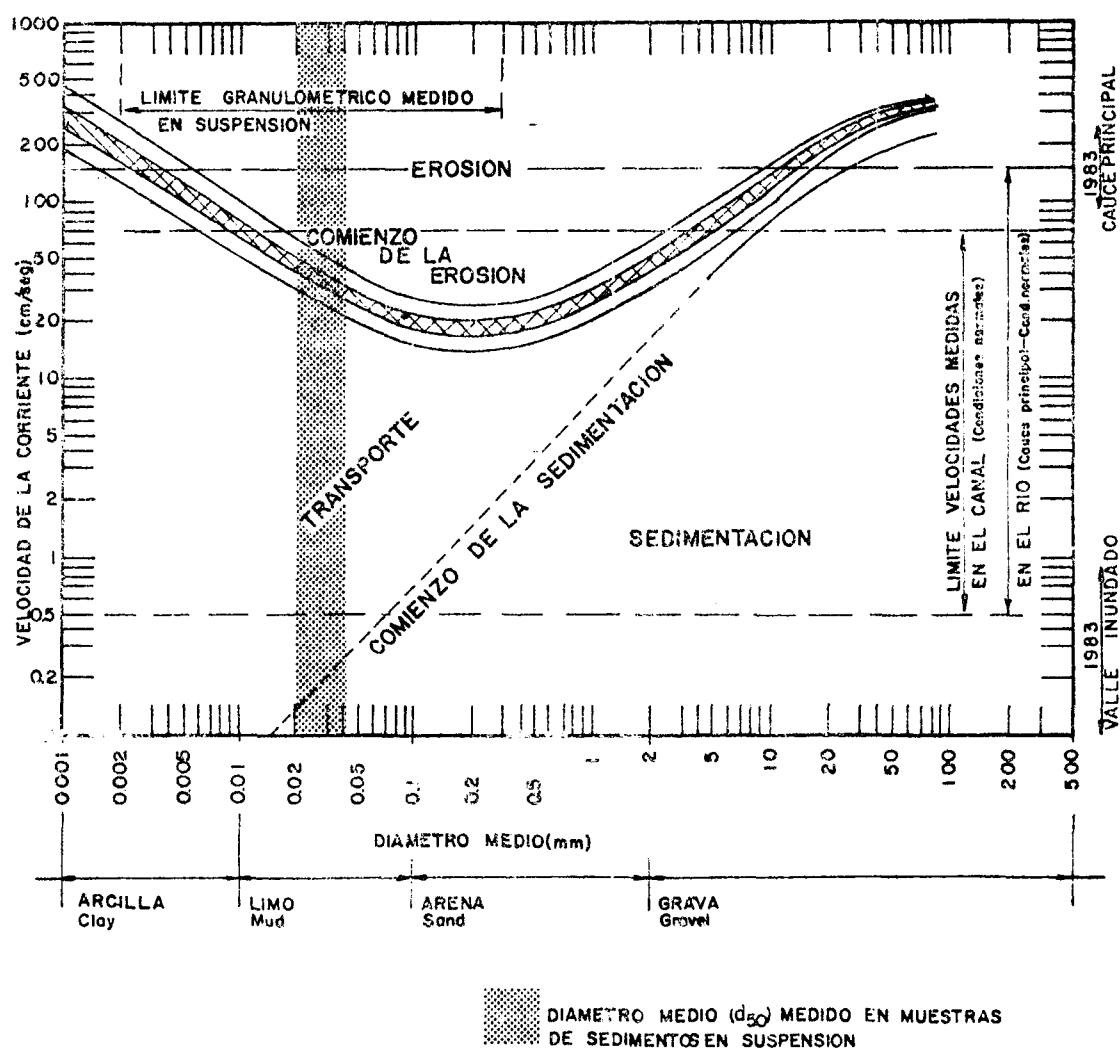


Fig. 9 Diagrama de Hjulström para el Paraná de las Palmas.
Hjulström's diagram for the Paraná de las Palmas river.

5.0.0.0 DESCARGA DE EFLUENTES LIQUIDOS EN EL PARANA DE LAS PALMAS.

Los efluentes líquidos de baja actividad de la Central Nuclear en Atucha I, previo control, son inyectados en el Paraná de las Palmas atendiendo a los límites de licenciamiento fijados. Las descargas se efectúan periódicamente y su duración depende del caudal de las bombas que operan durante la descarga y del volumen de los tanques de almacenamiento.

En la pileta de efecto sifón (Fig.2) se produce una primera dilución con el agua de refrigeración cuyo caudal es de $19 \text{ m}^3/\text{s}$ con la Central Nuclear en operación, mientras que cuando la misma está fuera de servicio, dicho caudal se reduce a menos del 10% del valor antes mencionado.

A partir de la pileta de efecto sifón los efluentes son conducidos por cañerías (150 m), hasta la turbina hidráulica para luego descargar al río Paraná de las Palmas por canal a cielo abierto de 250 m de longitud.

En el Paraná de las Palmas los efluentes liberados, junto con el agua de refrigeración, se mezclan, difunden y dispersan.

En condiciones normales las aguas escurren por canales o el cauce del río sin desbordar o invadir el valle bajo inundable.

En la avenida extraordinaria del presente año las aguas invadieron el valle inundable durante más de doce meses y aún se mantienen niveles extremos. La trayectoria de las descargas de efluentes en condiciones de inundación así como los procesos de intercambio agua-sedimentos se alteran. Sobre el valle inundable y fuera del cauce principal se forman corrientes secundarias de reducida velocidad en las que predomina los efluentes descargados debido a la mayor temperatura de los mismos, configuración del terreno, mayor rugosidad y vegetación típica de áreas inundables.

El paso de grandes buques produce, por otra parte, corrientes transversales de agua que alteran el flujo natural. La frecuencia y porte bruto de las naves condicionan también, por lo tanto, el mezclado de los efluentes con el flujo principal del río.

5.1.0.0 NUCLEIDOS Y FRECUENCIA DE LAS DESCARGAS

Los efluentes líquidos de baja actividad son emitidos periódicamente al río a través del canal de descarga, previa verificación de la concentración por espectrometría gamma.

Los iones radiactivos se diluyen, son fijados por los sedimentos, organismos vivos, o bien se depositan en el cauce del río. La dilución resultante es, en primera aproximación, inversamente proporcional al caudal del río cuando los nucleídos liberados completaron su mezclado aguas abajo de la descarga. Esta distancia de mezclado es mayor que 30 Km en el caso del Paraná de las Palmas.

Dada la incertidumbre con que podría determinarse esta distancia mínima de mezclado así como su amplio margen de variación, estimamos conveniente para el caso de Atucha I y II asumir como distancia de mezclado la longitud de 30 Km, es decir, una sección del río Paraná de las Palmas aguas arriba de la ciudad de Zárate.

En la Fig.10 se exponen la composición de los emisores de radiación gamma liberados mientras que en la Fig.11 se representó, para el año 1982 y 1983 la cantidad de radioisótopos emitidos incluyendo el tritio. Los gráficos representan actividades porcentuales mensuales emitidas referidos a los límites anuales de licenciamiento.

Los nucleídos de interés para este estudio son el Co^{60} ; Cs^{137} ; Sr^{90} y Cr^{51} .

Las descargas se realizan cada tres o cuatro días y el caudal emitido hacia la pileta antes mencionada varía según el tipo de bomba utilizada y volumen de los tanques a descargar. En general, estas emisiones ocupan un lapso comprendido entre dos y seis horas.

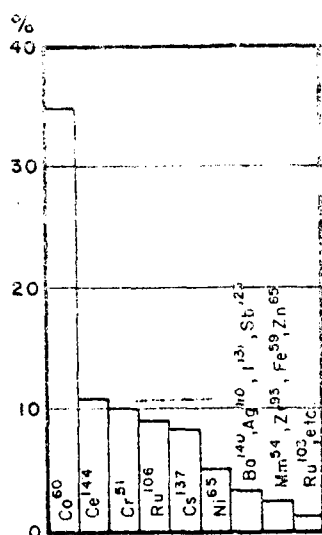
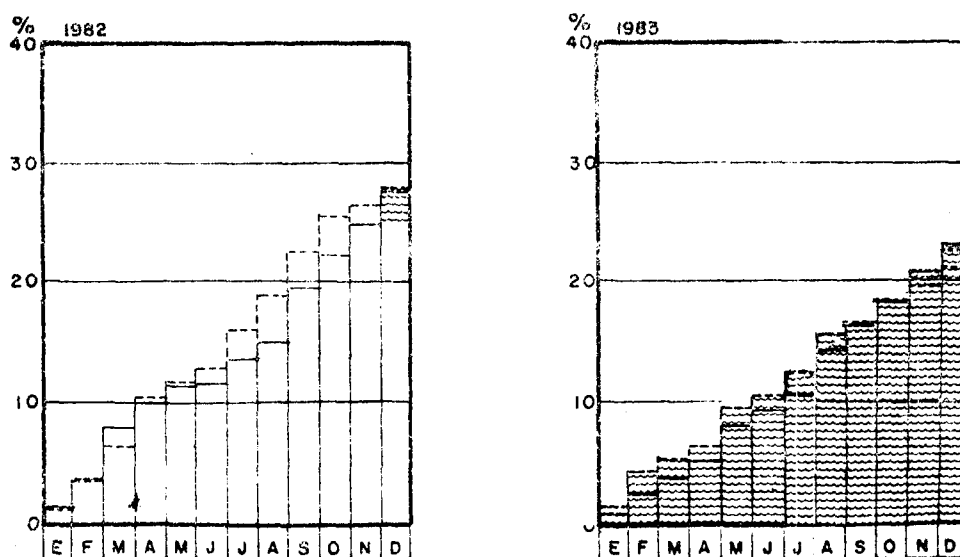


Fig. 6 Composición porcentual de los emisores gamma y beta liberados al río Paraná de las Palmas.

Percentual composition of the gamma and beta emitters released to the Paraná de las Palmas river.



Referencias:

▨ Inundacion del valle del Rio, — Tritio, — Emisores gamma

Fig. 7 Porcentaje mensual acumulativo (referido al límite anual de licenciamiento) de tritio y emisores gamma liberados al Paraná de las Palmas.

Cummulative monthly percentage (rsferred to the annual licensing limit) of tritium and gamma emitters released to the Paraná de las Palmas river.

6.0.0.0 EXTRACCION DE MUESTRAS DE SUELOS O LECHO DEL RIO
Y ANALISIS DE LA CONCENTRACION DE NUCLEIDOS
EN DICHAS MUESTRAS.

6.1.0.0 EXTRACTOR DE MUESTRAS (NO ALTERADAS) DE SEDIMENTOS
DE FONDO Y SUELOS INUNDADOS.

Este equipo (Fig.12) fue diseñado y construido específicamente para extraer muestras no alteradas que permitan determinar el perfil vertical de concentraciones de distintos nucleidos, en el lecho del río o suelos inundables.

Es desarmable y portátil; puede ser operado por una sola persona desde una embarcación.

Las muestras extraídas son de 60 mm de diámetro por 300 mm de largo.

El principio de funcionamiento está basado en la percusión de un cilindro hueco sobre una boquilla cortante de acero que al penetrar en los suelos aloja en su interior a la muestra la que es protegida por una camisa de P.V.C. que permite además la extracción y posterior manipulación de la misma, sin alteración.

El conjunto puede ser operado hasta una profundidad de 4 m.

6.2.0.0 ANALISIS DE LA CONCENTRACION DE NUCLEIDOS ARTIFICIALES
Y NATURALES EN LAS MUESTRAS DE SUELOS INUNDADOS.

Los cilindros de muestras de suelos fueron divididos en rodajas de 2 cm de altura, eliminándose por tamizado las fracciones o restos de raíces, tallos, etc. Luego de haber sido pesadas y secadas, estas muestras se homogeneizaron para lograr una uniforme geometría.

En estas condiciones se midieron por espectrometría gamma las actividades de los nucleidos artificiales Co^{60} y Cs^{137} y de los naturales Pb^{214} , Bi^{214} , Ac^{228} , Tl^{208} y K^{40} . Las curvas de eficiencia absoluta fueron determinadas con patrones adecuados.

La medición de Sr^{90} importa la destrucción de las muestras. Estas mediciones están en curso de ejecución.

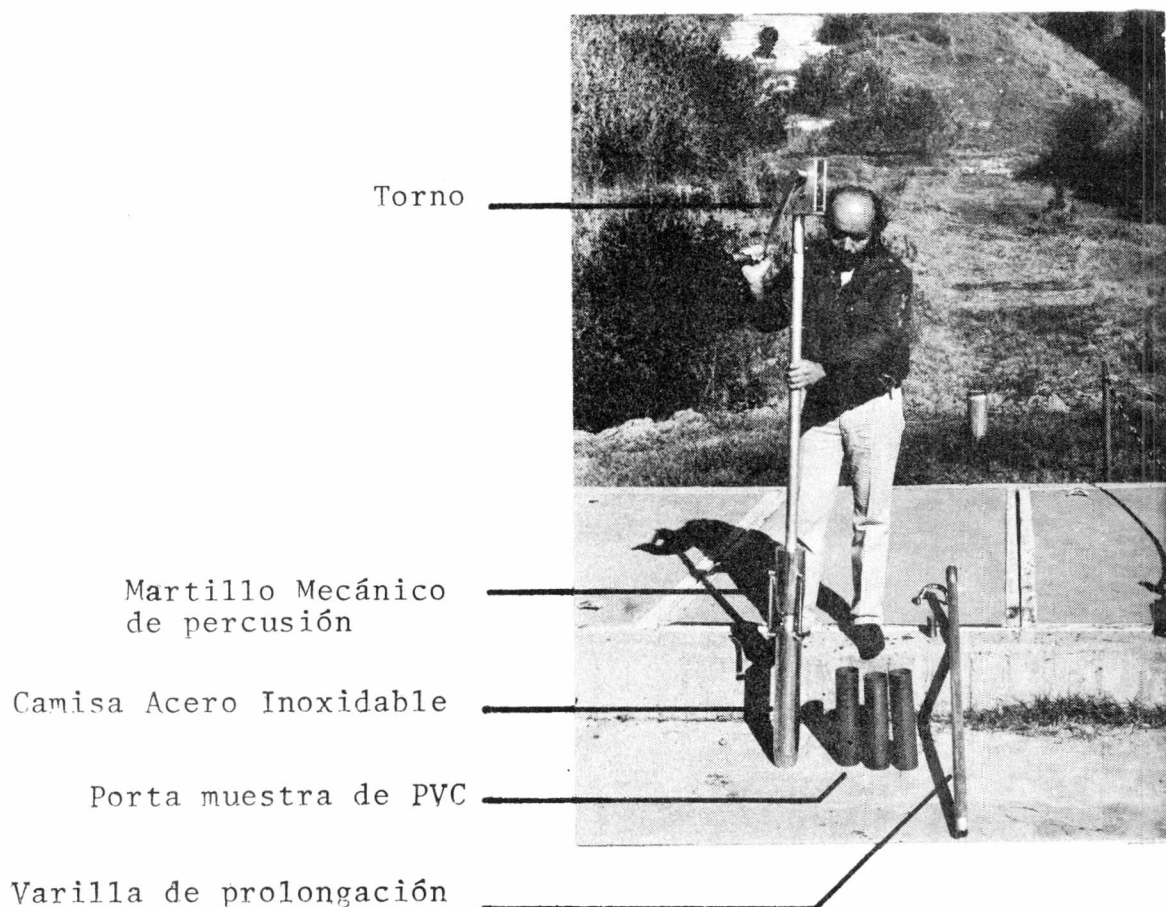
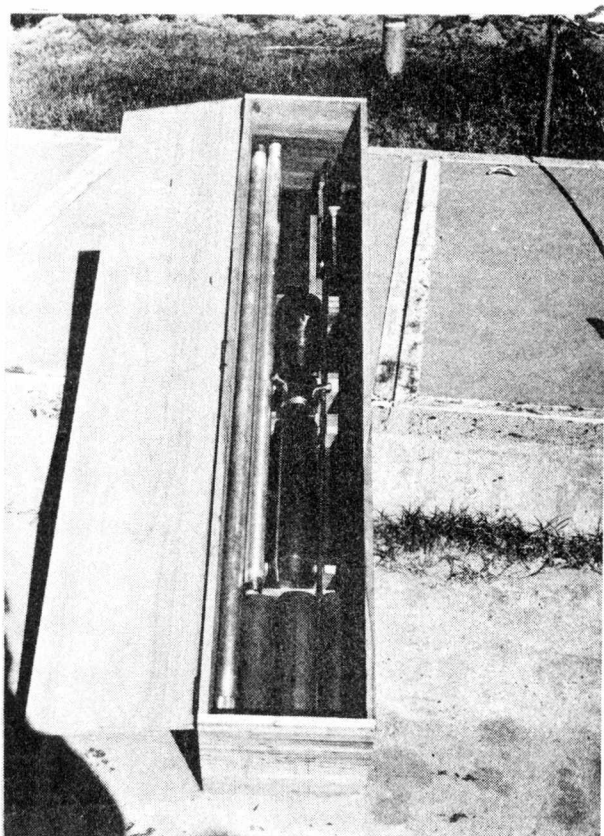


Fig. 12 Extractor de muestras no destruidas de sedimentos de fondo y suelos.
Extractor of non-destructed samples of background sediments and soils.

6.3.0.0 EVALUACION DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

En la Fig.13 se exponen los resultados de dos muestras típicas. La actividad específica de cada nucleído artificial o natural está referida a la masa presente en cada pequeño cilindro de 2 cm de altura.

Habiendo medido simultáneamente la concentración de nucleídos naturales de la familia del U, Th y K^{40} , se está en condiciones de evaluar el incremento de dosis a nivel de grupo crítico debido a la liberación de efluentes de central nuclear (dosis por exposición externa).

En general, estas mediciones directas son posibles solamente en ríos donde descargan sus efluentes numerosas instalaciones nucleares o después de haber transcurrido un prolongado lapso desde el inicio de dichas operaciones (9). También en esos casos suele ser necesario procesar importantes cantidades de sedimentos.

En nuestro caso, en cambio, fue posible detectar y medir la concentración de nucleídos artificiales debido a las particulares características de la pluma de descarga durante una prolongada inundación.

La concentración máxima de Co^{60} y Cs^{137} en muestras extraídas de la margen derecha del Paraná de las Palmas, en el tramo comprendido entre el canal de descarga y el grupo crítico o Club de Pesca está expuesta en la Fig.14. Corresponde a una franja de terreno de la margen derecha del río.

Como puede apreciarse la actividad por unidad de masa debida al Co^{60} es, en las inmediaciones del canal de descarga del mismo orden que la debida al K^{40} de origen natural.

En las inmediaciones del grupo crítico, en cambio, las máximas actividades por unidad de masa medidas y originadas en el Co^{60} y Cs^{137} están tres órdenes de magnitud por debajo de los niveles de referencia originados en los radionucleidos de origen natural.

La actividad por unidad de masa máxima expuesta en la Fig. 14, corresponden a los primeros 2 centímetros de suelo.

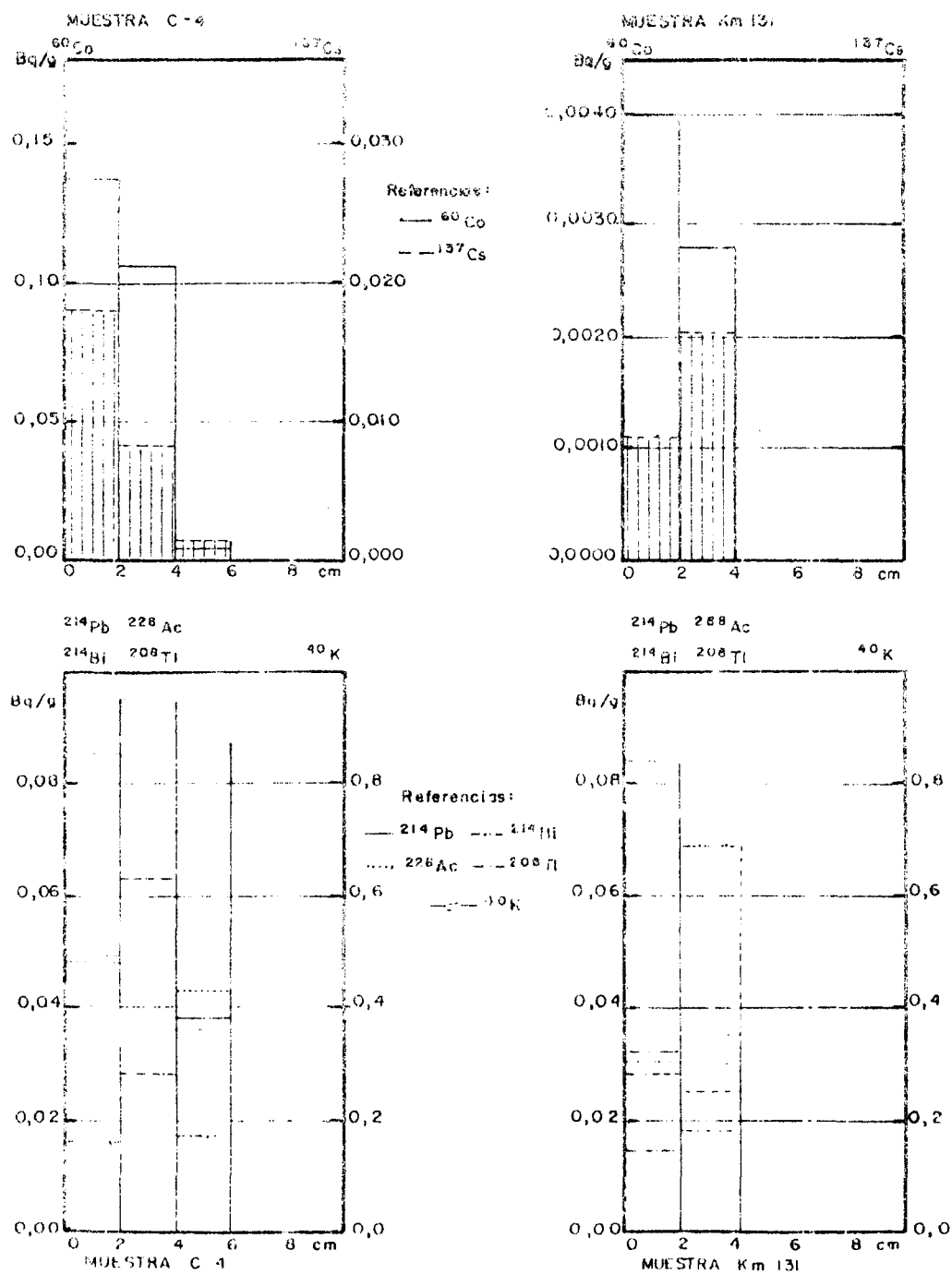


Fig. 9 Concentración y penetración de distintos nucleidos artificiales y naturales en suelos del valle inundado.

Concentration and penetration of different artificial and natural radionuclides in soils of the flooding valley.

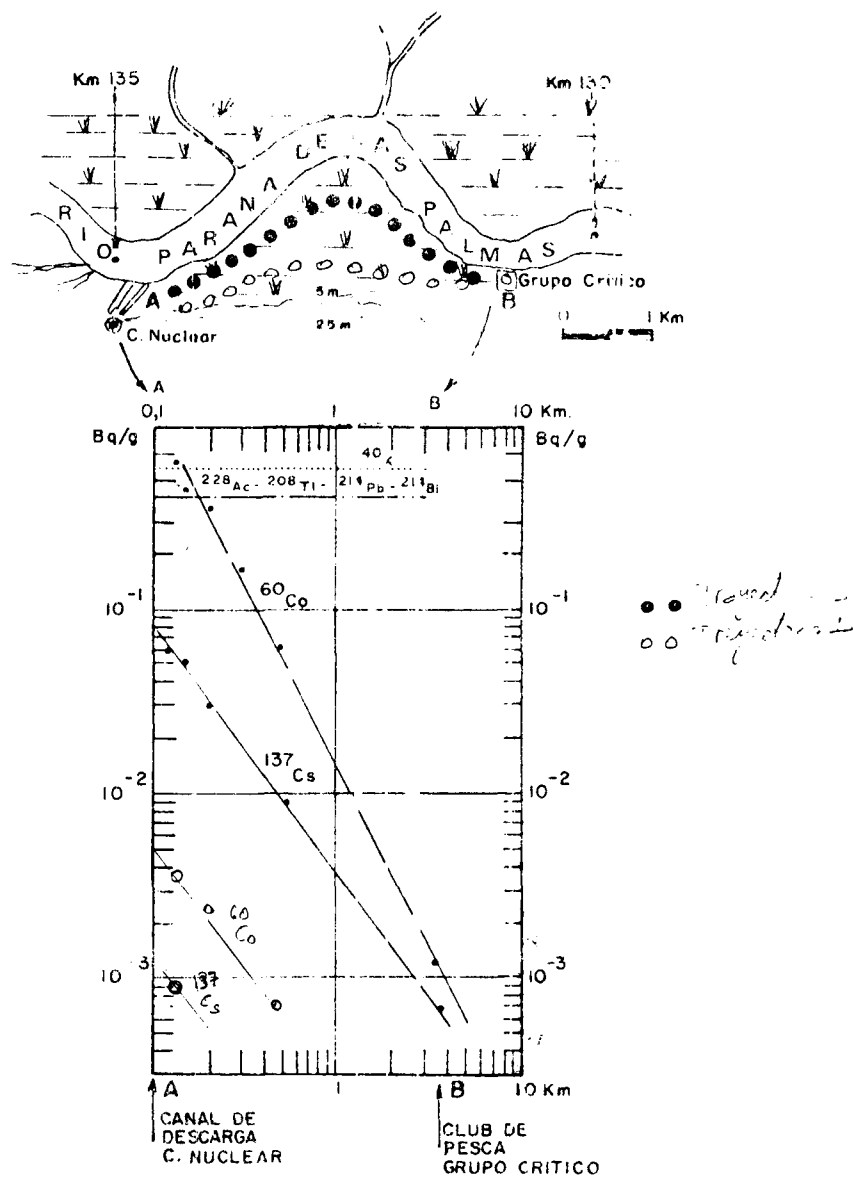


Fig. 10 Máximas actividades por unidad de masa de suelos inundados entre la Central Nuclear Atucha (y Grupo Crítico para Co-60 ; Cs-137 y promedios de nucleidos naturales.

Maximal activities per mass unit of flooding soils between Atucha I Nuclear Central and the critical group for Co-60 and Cs-137 and averages of natural nuclides.

7.0.0.0 COEFICIENTES DE DISTRIBUCION PARA SEDIMENTOS EN SUSPENSION

Cuando se alcanza el equilibrio entre el agua marcada con uno o más nucleídos y los sedimentos, queda definido el coeficiente de distribución entre ambas fases:

$$K_d = \frac{C_s}{C_w}$$

donde:

C_s = concentración del nucleído analizado en los sedimentos
(Bq g⁻¹).

C_w = concentración del mismo nucleído en agua: (Bq ml⁻¹)

Esta expresión en la que se admite una relación lineal entre soluto y solución en elevada dilución, podría ser susceptible de un tratamiento específico o selectivo frente a la complejidad de la naturaleza de los sedimentos y diversidad de los elementos que se intercambian. En esos casos, el tratamiento del problema podría efectuarse a través de leyes como la de Freundlich u otras isothermas como Langmuir, etc.

Se recomienda medir "in situ" o en laboratorio este coeficiente cuando existe la posibilidad de sobre dosis o sobre exposición para determinados grupos de personas (grupo crítico o nivel regional) y también cuando el modelo postulado (físico, matemático, etc.) es muy sensible a pequeñas variaciones de K_d .

También es recomendable la medición de este coeficiente cuando la carga de sedimentos es considerable. En los modelos matemáticos los límites de K_d deben ser impuestos dado que todo modelo es dependiente de K_d . (10).

7.1.0.0 EXTRACCION DE MUESTRAS, EQUIPOS UTILIZADOS Y MEDICION EN LABORATORIO.

7.1.1.0 Ubicación y periodicidad de las muestras extraídas.

Se midió la actividad específica de Co⁶⁰ y Cs¹³⁷ en sedimentos en suspensión a partir de muestras extraídas en los puntos ubicados en la Fig.3, prolongando el tiempo de contacto real en las muestras mediante agitación para tener la certeza de haber alcanzado un estado de equilibrio.

Durante el año hidrológico 1982-1983 se extrajeron doce series de muestras obteniéndose resultados positivos solamente en aquellas muestras que contienen mayores concentraciones de sedimentos en suspensión o bien, cuando la actividad de los líquidos liberados por la Central Nuclear era mayor.

7.1.2.0 Equipos de muestreo utilizados y extracción de muestras.

Para extraer muestras representativas y confiables de sedimentos en distintas verticales del río o canal se utilizó un equipo muestreador integrador US DH-48.

Las muestras puntuales se extrajeron con un equipo desarrollado en nuestro país por Agua y Energía Eléctrica E.A. que permite efectuar tomas de muestra en forma instantánea a un nivel prefijado.

Las muestras fueron extraídas de los lugares indicados en la Tabla III durante rutinarias descargas de nucleídos de baja actividad de la Central Nuclear en Atucha I.

7.1.3.0 Mediciones en laboratorio y evaluación de los resultados.

Las muestras de agua y sedimentos fueron filtradas en Büchner con papel coloidal y doble papel de filtro separándose así los sedimentos del agua. La parte sólida seca se montó sobre un soporte que permitió uniformar geometría y en algunos casos se eliminaron residuos orgánicos.

La fase líquida fue reducida por evaporación y coprecipitación.

Algunos de los resultados obtenidos están expuestos en la Tabla III.

Dadas las condiciones atípicas en que se debió operar, con muy reducidas concentraciones de sedimentos en suspensión (50 a 80 ppm) y al canal de descarga cubierto por altos niveles de agua, los errores de medición son apreciables pero los resultados compatibles, en una primera aproximación, con los registrados con otros sedimentos característicos de ríos aluviales (11).

Consideramos posible en el futuro próximo alcanzar significativos progresos en la calidad de los resultados procesados un mayor número de muestras y ajustando la técnica de extracción y medición a los límites de detección disponibles.

Aún no se ha logrado medir el coeficiente de distribución para el Sr^{90} y Cr^{51} . Los resultados alcanzados hasta el presente para Co y Cs teniendo en cuenta un número de muestras representativas del ciclo hidrológico 1982-1983 son:

$$\begin{array}{ll} \text{para Cs} & K_d = 2,5 \times 10^4 \pm 1,6 \times 10^4 \\ \text{para Co} & K_d = 1,5 \times 10^4 \pm 0,4 \times 10^4 \end{array}$$

Analizando estos resultados y errores en el amplio y complejo contexto de los sedimentos en suspensión los mismos pueden considerarse satisfactorios.

Las mediciones de concentraciones efectuadas, en todos los casos, suponen que se ha alcanzado el equilibrio. Para que ello ocurra y asegurar confiables resultados, en algunos casos se realizó una agitación prolongada de las muestras después de haber sido recogidas en el río o canal.

La evaluación de los coeficientes de distribución K_d en función del tiempo de contacto sería, en una primera aproximación:

$$k_d = \frac{V}{m} \left(\frac{C_0}{C_\infty} - 1 \right)$$

siendo:

C_0 = concentración de nucleídos en agua, al tiempo cero.

C_∞ = concentración de nucleídos en agua cuando se alcanza el equilibrio.

V = volumen de agua (m^3).

M = masa de sedimentos (g).

En el futuro se efectuarán mediciones de laboratorio para determinar en distintos casos estos tiempos de fijación y comprobar, si transcurrido un lapso muy prolongado o alterando la severidad de las condiciones físico-químicas o se modifica el fenómeno de sorción.

7.1.4.0 Primera aproximación para definir el destino de los nucleídos liberados por la Central Nuclear en Atucha.

Los sedimentos en suspensión, transportados por el agua de refrigeración ($20 \text{ m}^3/\text{s}$) son marcados por los nucleídos liberados por la Central Nuclear. Entre la isla nuclear y el río Paraná de las Palmas existe una pileta donde convergen todos los residuos líquidos, un tramo de conducción forzada y un canal de descarga al río.

En este recorrido y en los primeros tramos del río se efectúa por lo tanto, una significativa transferencia de los nucleídos de la fase agua a la fase sedimentos en suspensión. El factor de reducción $F_i(j)$ está luego definido por:

$$F_i(j) = \frac{1}{1 + K(j)X_i}$$

donde:

$F_i(j)$ = factor de reducción en agua debido a los sedimentos.

$K(j)$ = coeficiente de distribución, función del nucleído (j).

X_i = concentración de sedimentos en suspensión, función temporal cíclica i.

Del análisis de los parámetros que intervienen en la fórmula anterior surge que:

- .- El coeficiente de distribución ya determinado para Co y Cs depende, entre otras variables, de la naturaleza de los sedimentos.

Probablemente durante los meses de verano y otoño, cuando prevalecen los sedimentos originados en territorio Argentino, Paraguay o Boliviano (Río Bermejo, Paraguay, Pilcomayo, etc) la capacidad de intercambio por unidad de masa de sedimentos resulta mayor. Sin embargo no hemos encontrado hasta aquí significativas alteraciones que puedan caracterizar racionales ciclos anuales.

Las variaciones de cationes intercambiables entre la fase agua y sedimentos no son muy significativas razón por la que consideramos no influyen en estas determinaciones así como otras variables tales como pH, salinidad, etc.

- .- La concentración de sedimentos en suspensión, en cambio, tiene caracterizados ciclos anuales con definidos incrementos en verano y otoño.

En la Fig.8 se expone el ciclo anual obtenido a partir del análisis estadístico de 11 años de control, sin incluir el ciclo hidrológico 1982-1983 representándose allí los percentiles 10%, 50% y 90%.

Atendiendo a estas variaciones cíclicas se representa en la Fig. 15 el factor $F_i(j)$ de reducción, para Co y Cs.

Surge de estas investigaciones que la mayoría de los nucleídos liberados son transportados por el Paraná de Palmas en solución o suspensión. Hasta la desembocadura del río Paraná de las Palmas en el Río de la Plata no se producen significativos cambios en años hidrológicos normales, mientras que en ciclos hidrológicos extremos se pueden producir atípicas situaciones.

En el Río de la Plata y en particular el Canal Emilio Mitre prácticamente la totalidad de los sedimentos en suspensión sedimentan interviniendo entonces, preponderantemente, el dragado como factor que altera el natural destino de los sedimentos. Es por ello que en el capítulo siguiente efectuamos una expeditiva evaluación de este aspecto inducido.

En relación con los nucleídos transportados en solución suponemos que en las inmediaciones de la confluencia del Río de la Plata y el Océano Atlántico, la salinidad y otras severas alternativas físico-químicas condicionan las fases del transporte y destino final de los nucleídos.

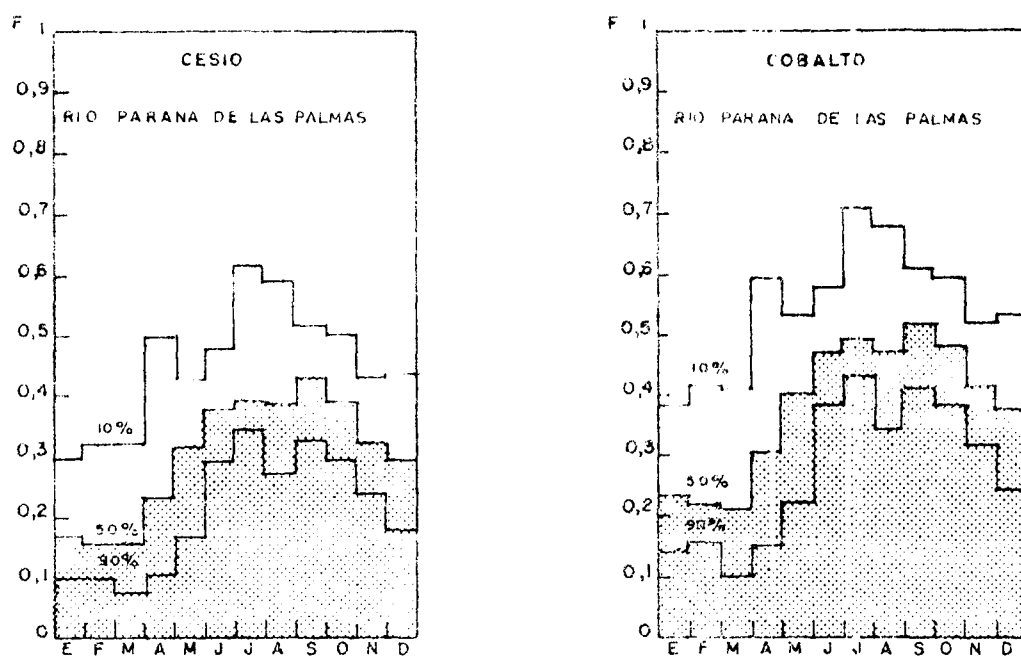


Fig. II Función temporal del factor de reducción (F) en agua (Co-y Cs) para sedimentos en suspensión.
Temporal function of the Co and Cs reduction factor (F) in water for suspended sediments.

8.0.0.0 NAVEGACION. DRAGADO

Por el río Paraná de las Palmas y el canal Emilio Mitre, en el Río de la Plata, navegan barcos de ultramar, cabotaje y fluviales. La máxima eslora permitida por el sistema es de 225 m y los pasos determinantes generalmente admiten calados a 9 m (30') más reglamentaria luz bajo quilla. (3).

El dragado está generalmente al servicio de la navegación en los pasos más comprometidos, accesos a puertos, etc.

Los volúmenes anuales dragados en el Río de la Plata son muy singificativos. En la Fig. 16 se exponen los volúmenes anuales dragados y las técnicas utilizadas. Marcando con AU¹⁹⁸ los sedimentos naturales del río, se efectuó un estudio de eficiencia de dragado que permitió evaluar la dispersión de los sedimentos refulados en función de la técnica empleada y condiciones hidrodinámicas del río (8).

La dispersión o transporte en suspensión de material dragado (refulado) está condicionada por la forma de volcar los sedimentos, dirección y velocidad de la marea, y profundidad de area de volcado.

En el río Paraná de las Palmas y aguas abajo de Atucha sólo se draga en las inmediaciones de puertos o en algunos pasos críticos. El volumen anual es muy reducido comparados con el del Río de la Plata y el canal Emilio Mitre.

Para interpretar los fenómenos de sedimentación, transporte y erosión en el Paraná de las Palmas (Atucha) en función de la velocidad del agua, se exponen en al Figs. 7, 8 y 9 estas relaciones para el río y el canal de toma de agua para refrigeración.

Una elevada proporción de los sedimentos que pasan en suspensión por Atucha, incluidos aquellos que ingresan por el circuito de refrigeración, sedimentan en el canal Emilio Mitre para luego ser removidos por dragado. Su destino final depende de este caso de la técnica de dragado o refulado (Fig. 16).

En el contexto de este contrato está previsto efectuar un balance general de los sedimentos que resultarían marcados por efluentes de la central nuclear así como una estimación de su destino final.

El paso de buques por el Paraná de las Palmas provoca la general erosión de las márgenes del río. Esta degradación es mayor en curvas o meandros.

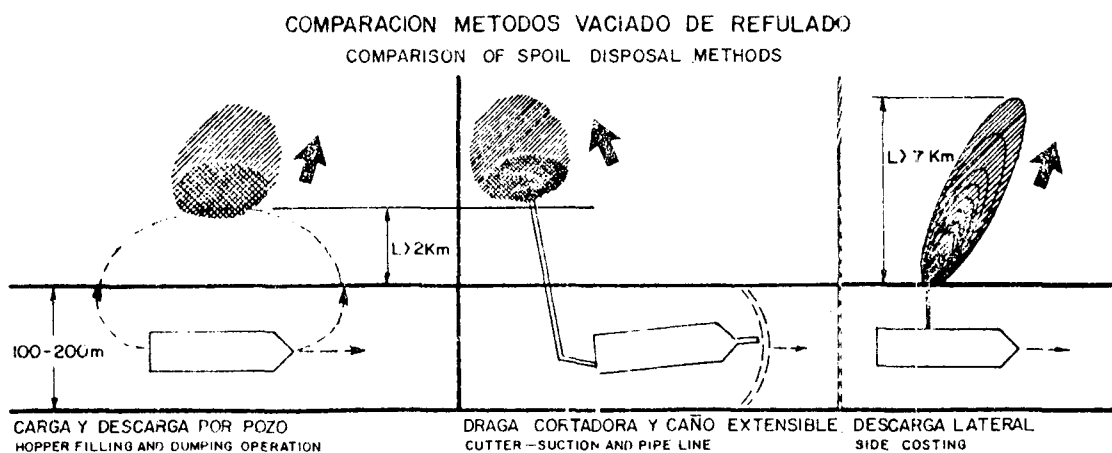
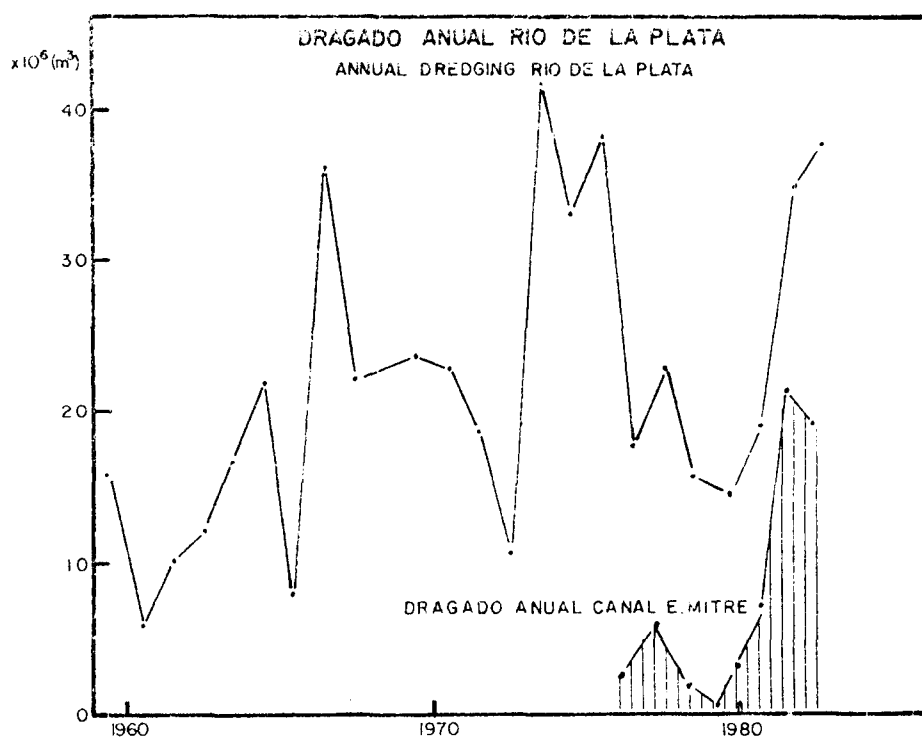


Fig. 16 Dragado anual y técnicas de dragado utilizadas en el río Paraná de Palmas, Río de la Plata y Canal Mitre.

Annual dredging and techniques of dredging used in Paraná de las Palmas river, Río de la Plata, and Mitre Canal.

9.0.0.0 CONCLUSIONES.

Durante ciclos hidrológicos normales la transferencia de nucleídos de la fase agua a los sedimentos en suspensión tiene carácter cíclico o estacional.

Durante un ciclo hidrológico extremo se producen importantes cambios en el transporte, transferencia y destino de los sedimentos marcados.

Cuando los canales de descarga tienen suficiente longitud para permitir un buen mezclado entre los sedimentos y los nucleídos liberados es posible determinar los coeficientes de distribución K_d a partir de muestras obtenidas "in situ". Los errores en la determinación de las concentraciones son significativos pero los resultados representativos de las reales condiciones que se verifican en la naturaleza: muy reducida concentración de nucleídos en ambas fases así como cambios temporales en la procedencia y naturaleza de los sedimentos o variables concentraciones de cationes intercambiables.

En los primeros nueve años de funcionamiento de la Central Nuclear en Atucha I no se detectó la presencia de nucleídos artificiales en el cauce del río Paraná de las Palmas, aún en sitios muy próximos a la descarga de la Central Nuclear. Durante la mayor inundación del siglo, en cambio fue detectada y medida la presencia de Co^{60} y Cs^{137} en suelos inundados de la margen derecha del Paraná de las Palmas. La penetración máxima de los nucleídos en dichos suelos fue de 6 cm después de 12 meses de inundación.

La concentración resultante de estos nucleídos en suelos cercanos al grupo crítico es tres órdenes de magnitud inferior a la concentración media de K^{40} para los primeros dos centímetros de esos suelos. El Ce^{144} , Cr^{51} , Ru^{106} y Sr^{90} no han sido detectados.

El dragado condiciona al destino final de los sedimentos. Durante una inundación a pesar de la baja concentración de sedimentos en suspensión la sedimentación es más notable en los canales artificiales de los estuarios debido al mayor tirante y reducción de la velocidad del agua en virtud del ciclo de mareas. Gran parte de los sedimentos que pasan por Atucha sedimentan en el canal artificial Emilio Mitre, sobre el Río de la Plata y luego son removidos por dragado.

ANEXO 4

CARACTERISTICAS FISICOQUIMICAS DE LAS AGUAS DEL PARANA DE LAS PALMAS

		MINIMOS	MAXIMOS	OBSERVACIONES
Temperatura	°C	11	29	Ver Fig. 6
pH		6,9	7,7	
Conductividad a 25°C	µS/cm	82	160	
Oxígeno O ₂	mg/l	9	15	Generalmente próxima a saturación
Cationes				
Ca ⁺⁺	mg/l	0,06	5,2	
Mg ⁺⁺	mg/l	0,10	0,12	
Na ⁺	mg/l	11	39	
K ⁺	mg/l	0,01	0,04	
NH ₄ ⁺	mg/l	0,15	0,28	
Fe	mg/l	0,08	6	
Cu ⁺⁺	mg/l	0,006	0,001	
Aniones				
Cl ⁻	mg/l	2	23	
SO ₄ ⁼	mg/l	12,6	16	
NO ₃ ⁻	mg/l			Análisis incompleto
NO ₂ ⁻	mg/l			Análisis incompleto
PO ₄ ⁼	mg/l	0,09	2,10	
P. Orgánico	mg/l	24	34	
SiO ₂	mg/l	6	15,5	
Residuo fijo a 180°C	mg/l	350	599	

TABLA II

ELEMENTOS TRAZA EN AGUA DEL PARANA DE LAS PALMAS

VALORES ENCONTRADOS			OBSERVACIONES
As	mg/l	$(4,1 \pm 1,6) 10^{-3}$	Extracción abril 1983
Sb	mg/l	$(2,61 \pm 0,23) 10^{-3}$	" " "
Mn	mg/l	$(1,15 \pm 0,10) 10^{-2}$	" " "
Co	mg/l	$< 1,2 \times 10^{-3}$	" " "
Cr	mg/l	$(4,7 \pm 2,4) 10^{-3}$	" " "
		$(4,1 \pm 1,9) 10^{-3}$	" " "
Zn	mg/l	$0,158 \pm 0,022$	" " "
		$0,312 \pm 0,027$	" " "

TABLA III

COEFICIENTES DE DISTRIBUCION K_d (ml/g)

LUGAR DE EXTRACCION ver Fig. 2	K_d^{Cs}	K_d^{Co}
D-3 (enero 1983)	$2,2 \cdot 10^4 \pm 1,2 \cdot 10^4$	$1,6 \cdot 10^4 \pm 0,4 \cdot 10^4$
D-3 (octubre 1983)	$2,4 \cdot 10^4 \pm 1,3 \cdot 10^4$	$1,7 \cdot 10^4 \pm 0,4 \cdot 10^4$
C-3 (abril 1983)	$2,3 \cdot 10^4 \pm 1,7 \cdot 10^4$	$1,5 \cdot 10^4 \pm 0,3 \cdot 10^4$
(abril 1983)	---	$1,1 \cdot 10^4 \pm 0,5 \cdot 10^4$
D-5 (abril 1983)	$2,7 \cdot 10^4 \pm 1,9 \cdot 10^4$	$1,8 \cdot 10^4 \pm 0,4 \cdot 10^4$
.....		
Valor medio	$2,5 \cdot 10^4 \pm 1,6 \cdot 10^4$	$1,5 \cdot 10^4 \pm 0,4 \cdot 10^4$

ANEXO I

AFORO DE LOS RIOS PARANA DE LAS PALMAS Y PARANA GUAZU REALIZADO POR EL INSTITUTO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNICAS HIDRICAS (INCYTH) DURANTE LAS AVENIDAS DEL CICLO HIDROLOGICO 1982-1983 (13 y 14 de abril de 1983)

Durante la avenida actual se realizó un aforo de los dos principales ríos que conforman el Delta del Paraná. Los resultados están expuestos a continuación mientras que en la figura siguiente se exponen los niveles en distintas estaciones hidrométricas, incluida la Central Nuclear en Atucha.

	ANCHO (m)	TIRANTE (m)	VELOCIDAD (m/s)	CAUDAL (m ³ /s)
Paraná de las Palmas	87	7,5	1,264	825
	116,5	8	1,174	1.095
	95,5	12	1,082	2.155
	70,5	16	1,052	1.865
	42,0	21	1,020	1.605
	14,5	16	1,524	355
	20	12	1,209	290
				<u>8.190</u>
Paraná Guazú	40	15	0,982	590
	74	25	1,497	2.770
	106,5	30	1,477	4.720
	57,5	34	1,722	3.365
	58,5	35	2,080	4.260
	71	34	2,275	5.490
	72,5	34	2,432	5.995
	89	33	1,855	5.450
				<u>32.640</u>

Nivel del río Paraná de las Palmas en Atucha al día de aforo: h = 4,40 m

Niveles máximos en Atucha en el ciclo 1982-1983: h = 4,55 m (1-4-83)

h = 5,05 m (12-6-83)

h = 5,29 m (13-7-83)

h = 5,27 m (31-7-83)

Q total = 32.640 + 8.190 = 40.830 m³/s (13 y 14 de abril de 1983)

Caudal del Paraná de las Palmas referido al Paraná Guazú: 25%

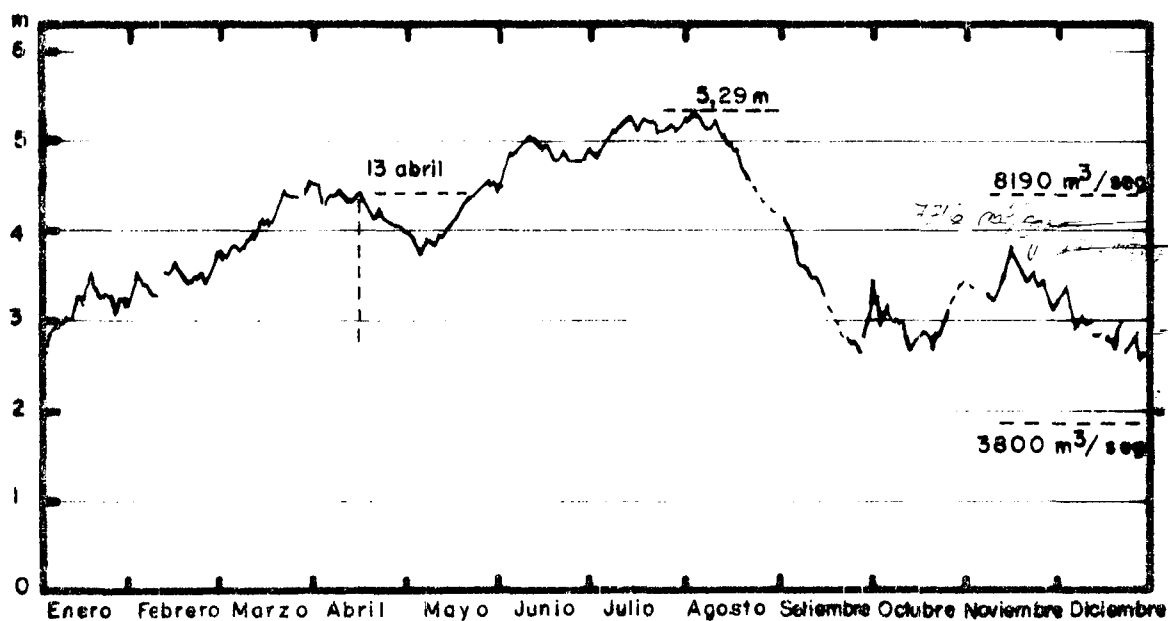


Fig. 17 Niveles en Atucha durante la crecida del año 1983.
Cota de Atucha igual a cero del Riachuelo. Cero local
aproximadamente comprendido entre 1 m y 1,20 m (no definido)

A N E X O II

DETERMINACION DE COEFICIENTES DE DIFUSION (K_y , K_x)

EN EL PARANA DE LAS PALMAS

Como antecedente relativo a la aplicación de trazadores radiactivos para la determinación de estos coeficientes puede citarse la experiencia llevada a cabo por el Instituto Nacional de Ciencia y Técnicas Hídricas (INCYTH) y la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) en el río Paraná de las Palmas entre los km 110 y 90 (Vuelta de Hinojo).

El área seleccionada corresponde a un meandro sobre la margen derecha en un sector de reducida turbulencia habiéndose realizado estas experiencias durante el transcurso de una pleamar, es decir con mínimas corrientes.

La ecuación diferencial bidimensional que rige el comportamiento de un contaminante luego de una inyección puntual, es la siguiente:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = K_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - \bar{u}_x \frac{\partial C}{\partial x} - \bar{u}_y \frac{\partial C}{\partial y} - \lambda C + \frac{M}{V} \delta(t) \quad (1)$$

$$C_0 = M/V$$

siendo:

C: concentración del contaminante en función de x y de t.

K_x, K_y : coeficientes de dispersión

τ : constante de reacción del contaminante

M: Masa inyectada

V: volumen inyectado;

C_0 : Concentración inicial

δ : función impulso unitario

Resolviendo esta ecuación se obtiene la concentración en función del tiempo y del espacio:

$$C = \frac{M/h}{2\pi \sqrt{2 K_x t} \sqrt{2 K_y t}} \exp \left\{ - \left[\frac{(x - \bar{u}_x t)^2}{4 K_x t} + \frac{(y - \bar{u}_y t)^2}{4 K_y t} \right] - \lambda t \right\} \quad (2)$$

Esto indica que luego del instante de la inyección se van formando elipsoides que se desplazan aguas abajo.

Las elipsoides, delimitadas por curvas de isoconcentración, tienen un punto de máxima concentración que se desplaza a una velocidad cuyas componentes son $\bar{u}_x$ y $\bar{u}_y$ y cuya magnitud está dada por la expresión siguiente:

$$C_{max} = \frac{M/h}{2\pi \sqrt{2 K_x t} \sqrt{2 K_y t}} e^{-\lambda t} \quad (3)$$

Si se reemplaza en la expresión (2), se toman logaritmos y se opera, se obtiene la ecuación representativa de la elipse con una concentración C en su perímetro.

$$\frac{(x - \bar{u}_x t)^2}{4 K_x t \ln \left[\frac{C_{max}}{C} \right]} + \frac{(y - \bar{u}_y t)^2}{4 K_y t \ln \left[\frac{C_{max}}{C} \right]} = 1$$

A partir de la medición de los diámetros mayor y menor de esta figura es posible determinar los valores de K_y y K_x , respectivamente.

$$K_x = \frac{a^2}{4 t \ln \left[\frac{C_{max}}{C} \right]} ; \quad K_y = \frac{b^2}{4 t \ln \left[\frac{C_{max}}{C} \right]}$$

siendo:

a: diámetro mayor de la elipse

b: diámetro menor de la elipse

También pueden obtenerse los coeficientes de difusión a partir de la determinación experimental de la varianza.

La solución de la ecuación (2) para una sola dimensión (x) es la siguiente:

$$C(x,t) = C_{\max} e^{-\frac{(x-\bar{u}_x t)^2}{4 K_x t}}$$

donde $C_{\max}$ es función de K_x , λ , C_0 y t . Esta expresión puede igualarse a la correspondiente a la función de frecuencia normal o de Gauss.

$$f(x) = C_{\max} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-\bar{x}}{\sigma_x} \right)^2}$$

resultando entonces:

$$\bar{x} = \bar{u}_x t$$

$$\sigma_x^2 = 2 K_x t$$

Derivando esta expresión con respecto al tiempo y despejando K_x se obtiene la expresión siguiente:

$$K_x = \frac{1}{2} \frac{d(\sigma^2)}{dt}$$

La derivada puede expresarse por medio de diferencias finitas:

$$K_x = \frac{(\sigma_x^2)_2 - (\sigma_x^2)_1}{2 (t_2 - t_1)}$$

siendo $(\sigma_x^2)_2$ y $(\sigma_x^2)_1$ los valores de la varianza espacial para los instantes t_2 y t_1 respectivamente. Considerando que toda la pluma está comprendida entre $\bar{x} \pm 2\sigma_x$, la longitud total de la misma será, aproximadamente:

$$L = 4 \sigma_x$$

o sea:

$$\sigma_x^2 = \frac{L^2}{16}$$

y finalmente:

$$K_x = \frac{L_2^2 - L_1^2}{32(t_2 - t_1)}$$

Para el desarrollo práctico de estos conceptos se efectuaron tres inyecciones en el Río Paraná de las Palmas. Para la primera, sobre un margen del río, se emplearon 50 mCi de In-113m; para la segunda, en el centro, sobre un canal, se usaron 300 mCi de I-131; mientras que para la tercera, efectuada en un punto intermedio, se trabajó con 645 mCi de I-131.

El rastreo de la nube radiactiva a través de sucesivas "corridas" permitió obtener un conjunto de valores de actividad en función de las coordenadas (x, y) y a partir de ellos determinar las curvas de isoactividad, es decir, los contornos de las elipses.

Según los resultados de estas experiencias, los coeficientes de dispersión para un sector de la Vuelta de Hinojo (áreas de muy baja dispersión durante una pleamar) estarían comprendidos entre los siguientes valores:

$$2 \text{ m}^2/\text{seg} > K_x > 0,03 \text{ m}^2/\text{seg}$$

$$0,03 \text{ m}^2/\text{seg} > K_y > 0,008 \text{ m}^2/\text{seg}$$

Sobre el centro del río, en cambio, los coeficientes de dispersión están comprendidos entre 100 y 1000 m²/seg. Los valores instantáneos y diarios acusan variaciones significativas que son función de los ciclos de mareas diarias, vientos sobre el río de la Plata, etc.

El interés de estas experiencias se inserta en el marco de un estudio de transferencia de nucleidos de la fase líquida a la sólida. Cabe poner de manifiesto que:

- los coeficientes de difusión difieren en varios órdenes de magnitud en un mismo sector de un río aluvial con meandros. En áreas cercanas a las márgenes u orillas donde la profundidad y velocidad son reducidas la capacidad autodepuradora de las aguas es muy baja si la comparamos con la que existe sobre el cauce principal del río.
Este aspecto debe tenerse presente cuando se diseña o proyecta un canal o conducto de descarga cuya función es liberar efluentes líquidos o sólidos en suspensión.
- Los coeficientes de distribución difieren en órdenes de magnitud en relación con el estado de la marea. Durante la pleamar y baja mar las velocidades son muy reducidas favoreciendo la sedimentación, intercambio u otros fenómenos físico-químicos.
Resultaría por consiguiente, conveniente tener presente esta conclusión para liberar contaminantes cuando las descargas intermitentes lo permiten.

BIBLIOGRAFIA

- 1 Documento SG-S6. Guía de Seguridad sobre dispersión hidrológica de sustancias radiactivas en relación con el emplazamiento de centrales Nucleares. Revisión nº 6. 80-12-10. OIEA
- 2 GOMEZ, H.R. y otros. Estudio hidrológico para la Central Nuclear en Atucha. CNEA. Noviembre 1980.
- 3 GOMEZ, H.R. y otros. Análisis de bajantes extremas naturales e inducidas en los ríos Paraná y Paraná de las Palmas. CNEA. DI 5/82. 1982.
- 4 GOMEZ, H.R. y otros. Estudio de navegación y tráfico por el Paraná de las Palmas. Central Nuclear en Atucha I. DI 5/81. 1981.
- 5 GOMEZ, H.R. y otros. Transporte de sedimentos por acarreo. Río Paraná. Técnicas nucleares y batimétricas. Comisión Nacional de Energía Atómica. Dirección Nacional de Construcciones Portuarias y Vías Navegables. 1977.
- 6 MILLE, H. Transporte total de material de lecho en el río Paraná. Instituto Nacional de Ciencia y Técnicas Hídricas. Laboratorio de Hidráulica Aplicada. Ezeiza. 1974.
- 7 LAGO, J.J. y otros. Determinaciones de dispersión y dilución en el río Paraná (Vuelta del Hinojo), con aplicación de trazadores radiactivos. Instituto Nacional de Ciencia y Técnicas Hídricas. Comisión Nacional de Energía Atómica. 1977.
- 8 River Plate dredging study. Dirección Nacional de Construcciones Portuarias y Vías Navegables. Buenos Aires. Sir William Halcrow and Partners. Cons. Engineers. London.
- 9 Pickering, R.J. Radioactivity in bottom sediment of the Clinch and Tennessee Rivers. SM 72/4.
- 10 Dirección Nacional de Construcciones Portuarias y Vías Navegables. Estadística sobre concentración de sedimentos en suspensión para Rosario.
- 11 Generic Models and Parameters for Assessing the environmental transfer of Radionuclides from Routine Releases. Exp. of critical groups. Safety series Nº 57 OIEA. 1982.
- 12 FARAH, M.Y. et al. Laboratory studies on the retention and release of some radioisotopes by clay minerals and fresh water stream biota. IAEA-SM-257/98P. Proc. of a Symposium Knoxville. 1981.
- 13 MIETTINEN, J.K. Distribution coefficients of radionuclides between finnish soils and ground water. IAEA-SM-257/16P- Proc of a Symposium Knoxville. 1981.
- 14 LOPARDO, R.A. Modelo de Vuelta de San Antonio. Río Paraná de las Palmas. Informe interno. INCYTH. 15-12-1971
- 15 HOPWOOD, H.J.; BESIO, C.A. Canal de toma de la Central Nuclear en Atucha. Mediciones de campaña y laboratorio. INCYTH. S-3-021-1982

