

JUAN A. BONNET

ASPECTOS CIENTÍFICOS - TECNOLÓGICOS  
DE LA  
CALIDAD AMBIENTAL  
DEL  
AIRE, LAS AGUAS Y LOS SUELOS  
APLICADOS A PUERTO RICO



01  
ISRIC LIBRARY

PR - 1974.01

Wageningen  
The Netherlands

ESTADO LIBRE ASOCIADO DE PUERTO RICO  
DEPARTAMENTO DE INSTRUCCIÓN PÚBLICA  
DIVISIÓN EDITORIAL



2852



ASPECTOS CIENTÍFICOS - TECNOLÓGICOS DE LA  
CALIDAD AMBIENTAL DEL AIRE, LAS AGUAS  
Y LOS SUELOS APLICADOS A PUERTO RICO

Presented before the 1970 Annual Meeting of the  
American Geophysical Union, December 29, 1970  
Honolulu, Hawaii. This meeting is the 51st  
Annual Meeting of the American Geophysical Union.  
Copyright 1971 by the American Geophysical Union.  
Printed in the United States of America.

ESTADISTICAL DEL  
ESTADO DE PUERTO RICO  
Y SUS AUTORIDADES PÚBLICAS  
Y SUS AUTORIDADES PÚBLICAS DE PUERTO RICO

# ASPECTOS CIENTÍFICOS - TECNOLÓGICOS DE LA CALIDAD AMBIENTAL DEL AIRE, LAS AGUAS Y LOS SUELOS APLICADOS A PUERTO RICO

JUAN A. BONNET

(Químico de Suelos e Ingeniero Químico)

Scanned from original by ISRIC - World Soil Information, as ICSU World Data Centre for Soils. The purpose is to make a safe depository for endangered documents and to make the accrued information available for consultation, following Fair Use Guidelines. Every effort is taken to respect Copyright of the materials within the archives where the identification of the Copyright holder is clear and, where feasible, to contact the originators. For questions please contact [soil.isric@wur.nl](mailto:soil.isric@wur.nl) indicating the item reference number concerned.

EDITORIAL DEL  
DEPARTAMENTO DE INSTRUCCIÓN PÚBLICA  
ESTADO LIBRE ASOCIADO DE PUERTO RICO

- 1974 -

ISBN 2832

Derechos reservados  
por el autor

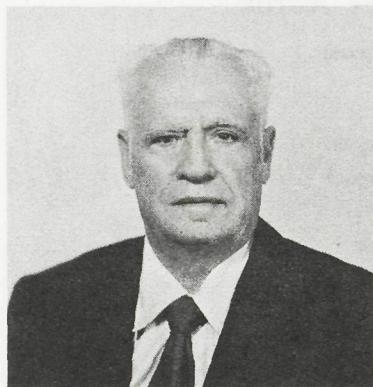
Cesión del autor de esta  
edición para uso en las  
escuelas públicas de Puerto Rico

Copyright © 1974, by  
Departamento de Instrucción Pública  
Estado Libre Asociado de Puerto Rico

IMPRESO EN LOS TALLERES DE ARTES GRÁFICAS  
DEL DEPARTAMENTO DE INSTRUCCIÓN PÚBLICA DEL  
ESTADO LIBRE ASOCIADO DE PUERTO RICO • 1974  
CALLE HOARE NÚM. 705 • SANTURCE, PUERTO RICO  
*Impreso en Puerto Rico • Printed in Puerto Rico*

DR. JUAN A. BONNET: EL AUTOR  
(Breves datos biográficos)

## BREVES DATOS BIOGRÁFICOS SOBRE EL AUTOR



Es el DR. JUAN A. BONNET, ingeniero químico y químico de suelos. Obtuvo su doctorado en la Universidad de Wisconsin, en el 1939.

Trabajó como Jefe del Departamento de Suelos en la Estación Experimental Agrícola de la Universidad de Puerto Rico, desde 1931 hasta el 1966 que se acogió a los beneficios de retiro.

Su libro *LA CIENCIA DEL SUELO* fue publicado en 1968 por el Colegio de Ingenieros, Arquitectos y Agrimensores de Puerto Rico.

El Dr. Bonnet es también el autor del libro *Edafología de los suelos salinos y sódicos*, publicado en el 1960, por la Estación Experimental Agrícola de la Universidad de Puerto Rico.

## Í N D I C E

	Página
PRÓLOGO .....	xi
INTRODUCCIÓN .....	1
EL AIRE .....	1
Normas para Puerto Rico; Cuadro Uno; Emisiones; Cuadro dos; Cuadro tres; Los contaminantes; Óxidos de azufre; Los particulados; El monóxido de carbono; Los hidrocarburos; Óxidos de Nitrógeno; Métodos Químicos	
LAS AGUAS .....	9
Normas de control; Cuadro cuatro; Cuadro cinco; Las siglas BOD, COD, TOC; Clases de aguas en Puerto Rico; Figura 1; Autoridad de Acueductos y Alcantarillados de Puerto Rico; Figura 2; Aguas Figura 3; Las aguas del mar; Contaminación marina en Puerto Rico; Tratamiento de aguas negras; Cuadro seis; Normas para el control de la contaminación del agua en Puerto Rico; Figura 4; Eutrofificación; Otras fuentes que contaminan las aguas.	
EL MOSTO, SUBPRODUCTO DEL RON, CONTAMINANTE DIFÍCIL DE TRATAR	
Cuadro siete .....	22
DESPERDICIOS SÓLIDOS .....	23
Rellenos sanitarios e incineración; Figura 5	
LOS SUELOS Y SU AMBIENTE .....	25
LA CIENCIA DEL SUELO .....	25
Definición del suelo; Meteorización; Perfil del suelo; Figura 6	
PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO .....	28
Textura; Figura 7; Estructura; Consistencia; Densidad; Figura 8	
COMPONENTES DEL SUELO .....	31
El aire del suelo; Figura 9; El agua del suelo; Suelos minerales y orgánicos; Materia orgánica	
CAPACIDAD DE INTERCAMBIO DE CATIONES DEL SUELO .....	32
Saturación de bases de los suelos	
FACTORES QUE LIMITAN EL CRECIMIENTO Y LA CALIDAD DE LAS COSECHAS .....	33
NUTRIMENTOS ESENCIALES PARA LAS PLANTAS .....	33
Teorías sobre la absorción de nutrientes por las plantas	

	Página
LOS FERTILIZANTES .....	34
PROCESOS BIOLÓGICOS DEL SUELO .....	34
Ciclo del carbono; Figura 10; Cuadro ocho; Figura 11; Descomposición de los hidratos de carbono; Descomposición de las hemicelulosas; Descomposición de la celulosa; Descomposición de las proteínas; Ligninas; Ciclo del nitrógeno; Aminización; Figura 12; Nitrificación; Desnitrificación; Fijación del nitrógeno simbótico y no-simbótico; Relación carbono-nitrógeno; Ciclo del azufre; Figura 13	
LOS SUELOS Y LA CONTAMINACIÓN .....	44
La contaminación agrícola y los suelos; Figura 14; El suelo como contaminante del aire; Figura 15; La quema anual de la paja de caña de azúcar en Puerto Rico; El suelo como contaminante de las aguas; Los sedimentos; Los agentes infecciosos y los compuestos orgánicos exóticos; Cuadro nueve; Suelos contaminados; Plagicidas persistentes en los suelos; Origen de los agentes infecciosos en los suelos; Sales, minerales e infertilidad de los suelos; El suelo como descontaminante.	
PRUEBAS SOBRE SUELOS CONTAMINADOS EN PUERTO RICO ..	51
Efecto de fungicidas; Efecto de sales; Efecto ecológico; Efecto físico; Efecto de las construcciones; Efecto de los desperdicios industriales; Efecto de la subida del nivel freático	
COMENTARIO FINAL .....	53
REFERENCIAS .....	54

## PRÓLOGO

Este Prontuario sobre el tema: *Aspectos científicos-tecnológicos de la calidad ambiental del aire, las aguas y los suelos, aplicados a Puerto Rico*, ha sido escrito para ser usado por estudiantes de la Escuela Superior que hayan tomado o estén tomando los cursos preliminares de Ciencia: Biología, Química y Física. El estudiante debe estar familiarizado o repasar los conceptos físicos y químicos sobre gases, líquidos, soluciones, oxidación, reducción y la función de los microorganismos en los procesos biológicos aerobios y anaerobios.

La Ciencia del Suelo es nueva para el estudiante; el Prontuario explica lo que es el suelo; cómo se forma; cuál es su composición y se discuten algunos nuevos conceptos físicos del suelo: textura, estructura, consistencia; químicos, tales como la propiedad de intercambio de cationes del suelo y la saturación de bases; fisiológicos, relación de cómo se nutre la planta de los nutrientes del suelo y los procesos biológicos del suelo: el ciclo de carbono: aminización, nitrificación, desnitrificación, fijación simbiótica y no-simbiótica del nitrógeno del aire y el ciclo del azufre.

La parte sobre *Contaminación del aire* consiste de quince páginas, en maquinilla a doble espacio; la de *Aguas* contiene 28 páginas y la de *Suelos* 47 páginas. El tema sobre *Aguas* incluye casi 5 páginas sobre el mosto, subproducto del ron y los desperdicios sólidos; explica el término Eutrofificación y las siglas BOD, COD, TOC, en inglés, que se refieren a: Demanda Bioquímica de Oxígeno, Demanda Química de Oxígeno y Carbón Orgánico Total, respectivamente.

Se expone en el Prontuario, lo que hemos aprendido de la Junta de Calidad Ambiental de Puerto Rico y de la Agencia de Protección Ambiental Federal sobre la contaminación ambiental especialmente en los aspectos aplicados a Puerto Rico relacionados con la contaminación del aire y las aguas. El tema de suelos, aplicado a Puerto Rico, es mi especialidad profesional adquirida en mi labor como Químico de Suelos y Jefe del Departamento de Suelos de la Estación Experimental Agrícola de la Universidad de Puerto Rico, durante los años de mi incumbencia, 1931-1966, cuando me acogí a la jubilación.

Se citan 39 referencias importantes; entre las cuales hay algunas relacionadas con Puerto Rico que el maestro puede escoger como tesis para los estudiantes. El Contenido y el Índice ayudarán al maestro a preparar el cuestionario para las clases y los exámenes.

Pruebas simples de laboratorio pueden hacerse por los estudiantes, bajo supervisión, relacionadas con la forma en que se toma una muestra de aire para análisis y se determina la presencia de particulados\*; cómo se determina el pH (acididad y alcalinidad), color, olor, sedimentos, en aguas y pH, carbonatos, color, textura y consistencia en suelos.

\* Término aceptado que indica grupo de partículas de diferentes tamaños.



## ASPECTOS CIENTÍFICOS-TECNOLÓGICOS DE LA CALIDAD AMBIENTAL DEL AIRE, LAS AGUAS Y LOS SUELOS, APLICADOS A PUERTO RICO

### INTRODUCCIÓN

El término, *calidad ambiental*, tiene mucha importancia para la sociedad. Se hace difícil definirlo y se dice que es la condición del aire. El Secretario de Agricultura de los Estados Unidos y el Director de la Oficina de Ciencia y Tecnología (36)\* definen el término, *contaminación ambiental*, como sigue: "La alteración desfavorable del ambiente debido a efectos directos e indirectos sobre las propiedades químicas, físicas y biológicas del aire, de las aguas y de los suelos producidos principalmente por el hombre". La Asociación Americana de Química añade: "que causan una desviación de la composición geoquímica promedio de dichos recursos naturales". Contaminado y poluto son sinónimos.

Muchos contaminantes escapan como emisiones hacia el aire donde se dispersan, se estacionan y luego son devueltos a la tierra. La mayor parte cae sobre los cuerpos de agua tales como los ríos, los mares y los lagos, atraídos por la fuerza de gravedad o impulsados por el viento, la lluvia, la nieve y los huracanes. Los contaminantes se introducen en el ambiente en forma de gases, de líquidos y de sólidos. También lo hacen por medio de la ocurrencia de fenómenos naturales como los fuegos forestales, la erosión del terreno y las erupciones volcánicas. Los contaminantes producidos por el hombre y sus actividades vienen principalmente de los vehículos de motor, de las industrias, la agricultura, los desperdicios domésticos y otros. Debemos saber: 1- Cuáles son los contaminantes 2- Cuánto emite cada uno 3- De qué fuente se originan y 4- Dónde radica la fuente.

El Gobierno de los Estados Unidos, por disposición de Leyes aprobadas por el Congreso, ha iniciado un programa intensivo a nivel nacional y local, para mejorar y proteger la salud de los seres humanos y de toda la fauna y la flora así como evitar daño a las cosas inanimadas como los metales, las pinturas, las gomas, etc. Los químicos y laboratorios bien equipados son esenciales para lograr éxito en el control complejo de los contaminantes.

Me limito aquí a tratar sobre los aspectos científicos y tecnológicos relacionados con los problemas de contaminación del aire, las aguas y los suelos, aplicados a las condiciones tropicales de Puerto Rico. Las personas interesadas más a fondo en estos problemas deben leer los Informes Ambientales de 1971 y 1972 publicados por la Junta de Calidad Ambiental (JCA) de Puerto Rico que fue creada por la Ley núm. 8 aprobada el 18 de junio de 1970.

### EL AIRE

La atmósfera es un sistema dinámico; recibe y absorbe continuamente sólidos, líquidos y gases naturales o producidos por el hombre, que viajan y son dispersados por el aire, reaccionando química y físicamente entre ellos y con otras sustancias. Finalmente se depositan en los mares, los lagos, los ríos, en la tierra, en las construcciones, sobre la vegetación, las personas y los animales. Algunos gases como

\* Los números en paréntesis se refieren a las Referencias citadas.

el helio, que es muy liviano, se escapan en la atmósfera y suben con otros como el bióxido de carbono con más rapidez y se acumulan en las capas superiores atmosféricas.

El aire limpio y puro contiene 78.09% de nitrógeno por volumen y 20.94% de oxígeno. Lo que resta, .97% son gases que incluyen pequeñas cantidades de bióxido de carbono, helio, argón, kriptón, xenón y gases inorgánicos y orgánicos que varían con el tiempo y sitio. El aire contiene también concentraciones de vapor de agua que varían entre 1 y 3%.

### Normas para Puerto Rico

La Agencia para la Protección Ambiental (EPA) de los Estados Unidos ha dado a la Junta de Calidad Ambiental (JCA) de Puerto Rico un plazo de tres años, hasta 1975, efectivo el 29 de enero de 1972, para establecer el patrón de normas para el control ambiental en el Área de Puerto Rico. El programa ha comenzado adoptando las normas federales establecidas por EPA con atención a las prioridades siguientes (cuadro 1): 1A- Control al grave problema del óxido de azufre y de las partículas en el aire y III- Control menos grave del monóxido de carbono, del óxido de nitrógeno, los hidrocarburos y los oxidantes fotoquímicos en el aire. Se está dando atención a la contaminación de las aguas y al manejo de la basura.

La JCA de Puerto Rico adoptó en enero 1972 un plan que establece tres normas fundamentales: 1- "Que las emisiones contaminantes deben ser controladas mediante el uso de la tecnología de control razonablemente disponible; 2- Que el aire debe estar lo suficientemente limpio para que no afecte adversamente la salud y el bienestar público, y; 3- Asegurarse que las nuevas fuentes estacionarias sean ubicadas en donde el daño al ambiente, si hubiera alguno, sea mínimo". El reglamento revisado limita el contenido de azufre en los combustibles y exige la reducción en tres etapas: "2.0% de azufre después de octubre 1, 1973; a 1.5% después de abril 1, 1974 y a 1.0% después de abril 1, 1975. En los municipios

Cuadro 1- Normas establecidas en Estados Unidos para la calidad ambiental del aire.

(Tomado de la Junta sobre Calidad Ambiental del ELA de P. R., Aire Limpio para Puerto Rico, páginas 43, 50, 57, 60, 63 y 67, 1971.)

Protección	Promedio Aritmético Anual	Concentración Máxima- 24 horas	Concentración Máxima- 3 horas
<b>Bióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>)</b>			
Primaria - para proteger la salud	80 ug/m <sup>3</sup> (.03 ppm)	365 ug/m <sup>3</sup> (.14 ppm)	
Secundaria - para proteger otros aspectos del bienestar	60 ug/m <sup>3</sup> (.02 ppm)	260 ug/m <sup>3</sup> (.1 ppm)	1,300 ug/m <sup>3</sup> (.5 ppm)
<b>Particulados</b>			
Primaria -para proteger la salud	75 ug/m <sup>3</sup>	260 ug/m <sup>3</sup>	
Secundaria - para proteger otros aspectos de la salud	60 ug/m <sup>3</sup>	150 ug/m <sup>3</sup>	

---

**Monóxido de Carbono — se expresa en milígramos por metro cúbico**

(CO)		
Primaria y	10 mg/m <sup>3</sup>	40 mg/m <sup>3</sup>
Secundaria	(9 ppm)	(35 ppm)

---

**Hidrocarburos (CH<sub>4</sub>)**

Primaria y	3 horas máximas de concentración
Secundaria	(6 - 9 A. M.) 160 ug/m <sup>3</sup> (.24 ppm)

---

**Oxido Nitroso (NO<sub>2</sub>)**

Primaria y	Promedio aritmético anual
Secundaria	100 ug/m <sup>3</sup> (.05 ppm)

---

**Oxidantes Fotoquímicos**

Primaria y	(O <sub>3</sub> )	Concentración Máxima de 1 hora
Secundaria		160 ug/m <sup>3</sup> (.05 ppm)

---

ug/m<sup>3</sup> - microgramos por metro cúbico; un microgramo = una millonésima parte de un gramo.  
ppm - partes por millón; refiérase a cuadro 3 para conversión de ug/m<sup>3</sup>.

pios de San Juan, Cataño, Guaynabo y Bayamón, donde la contaminación de SO<sub>2</sub> es mayor, se limita a 0.5% después de abril 1, 1975. Se instalarán inyectores de combustibles modificados para una mejor combustión de las aguas que contribuirán a disminuir la contaminación atmosférica."

**Emisiones**

El manejo adecuado del ambiente requiere predecir el movimiento y dirección de las emisiones de los agentes contaminantes especialmente en las ciudades y áreas regionales. El trabajo se lleva a cabo por medio de gases marcadores del aire tales como el hexafluoruro de azufre, el cloro liviano y con freón que es fluor con hidrocarburo. Estos gases son inodoros; se pueden medir en concentraciones ínfimas de una millonésima a una billonésima de un gramo usando una combinación de cromatografía de gas y del detector electrónico. El número y complejidad de las emisiones requiere el uso de computadores y de modelos matemáticos.

Las toneladas de emisiones estimadas en Puerto Rico por la JCA, para el año 1970, que vienen de las plantas industriales, la transportación, los desperdicios sólidos y otros y las medidas entre San Juan y 5 pueblos, para SO<sub>2</sub> y particulados se informan en el cuadro 2. La JCA ha establecido una serie de estaciones monitoras de rastreo, dispersadas en toda la Isla, para tomar muestras para análisis del aire y determinar la dirección y dispersión de las emisiones. Los datos recogidos servirán de base útil para reducir, limitar y prohibir, la concentración de industrias en una zona específica. Habrá más justificación para recomendar la reducción del azufre en el petróleo usado como combustible y extender las alturas de las chimeneas, uso de equipo y filtros adecuados para reducir las emisiones industriales y de los vehículos de motor, prohibir la quema de la paja residual que deja la caña de azúcar en los campos después de la cosecha, etc.

La concentración de la emisión del gas contaminante, monóxido de carbono, se expresa en milígramos por metro cúbico y la de los otros gases y los particulados, en microgramos por metro cúbico (cuadro 1). Estos valores se convierten a partes por millón (ppm) según se expresa en el cuadro 3;

**Cuadro 2- Emisiones anuales estimadas en Puerto Rico para 1970.**

(Tomado de: JCA de P. R., Aire Limpio para Puerto Rico, 1971, págs. 48b, 55a, 58a, 61a, ilustradas con mapas que demuestran la localización de las emisiones.)

Emisiones y Toneladas	Energía Eléctrica	Petroquí- micas	Cemento	Fábricas de Azúcar	Transpor- tación	Desperdicios sólidos	Otros
Bióxido de Azufre (SO <sub>2</sub> ) 135,000	% 57	% 14	% 2	% 6	% 6	1	14 <sup>1</sup>
Particulados 88,000	9	21	16	3	7	44 <sup>2</sup>	
Monóxido de Carbono (CO) 601,000			10	85	5		
Hidrocarburos 116,000	2		5	79	9	5 <sup>3</sup>	

/1- Usuarios comerciales e industriales pequeños de combustibles.

/2- Operaciones de arena, grava y piedra — 38%; plantas de asfalto, 6%.

/3- Otras plantas químicas.

**Cuadro 2- (Continúa) — emisiones medidas de bióxido de azufre en ciudades y pueblos con mayor polución en Puerto Rico.**  
(Tomado del Informe Ambiental de 1972 del ELA de P. R.)

Sitio	Bióxido de azufre (ug/m <sup>3</sup> ) Anual	Por 24 horas
Cataño	213**	929**
Toa Baja	143**	625**
San Juan	94**	412**
Guayanilla	85**	373**
Guánica	78*	339*
Dorado	76*	332*

\*\*. Excede las normas primarias (anual 80 ug/m<sup>3</sup>, 24 horas 365 ug/m<sup>3</sup>).

\*. Cumple con las normas primarias pero excede las secundarias (anual 60 ug/m<sup>3</sup>, 24 horas 260 ug/m<sup>3</sup>).

nótese que los oxidantes fotoquímicos se expresan como ozono ( $O_3$ ) y los hidrocarburos como metano ( $CH_4$ ).

Puerto Rico se encuentra en la trayectoria de los vientos alisios; un sistema grande de alta presión subtropical y semipermanente centralizado sobre el norte del Océano Atlántico. Son uno de los regímenes de viento más constantes en el mundo y ocasionalmente la trayectoria de una onda del este, o una tormenta tropical, o los remanentes de un frente de frío del norte, interrumpen el paso de las corrientes de aire sobre la isla. Durante el invierno predomina la dirección del este y durante el verano la del este-sureste. El patrón diario de la brisa marítima-terrestre se sobrepone a lo largo de cada una de las costas de Puerto Rico. Durante el día, sobre la costa norte, se cambia el viento a una dirección más hacia el noreste y hacia el sureste durante la noche. En la costa sur, los vientos son del sureste durante el día y de noreste durante la noche. En la costa oeste durante la tarde se produce viento del oeste. Estos patrones pueden variar cuando ocurre neblina y disturbios pasajeros. Un fenómeno característico observado de los vientos alisios es una frecuente inversión a 6,000 pies de altura. Ocurren inversiones frecuentes nocturnas en la superficie durante los meses de invierno; menos frecuente en verano. Dichas inversiones desaparecen tarde en la mañana o por la tarde. Algunas comunidades como las ubicadas en los valles naturales alrededor de las bahías o en llanos rodeados por montañas tienen problemas muy especiales de contaminación. Estas depresiones no tienen ventilación adecuada y bajo condiciones de inversión se atrapan los contaminantes.

Cuadro 3- Conversión\* a partes por millón de microgramos o miligramos por metro cúbico expresados en el cuadro 1

	Partes por millón (ppm)	Modo de Conversión
Fotoxidante	$SO_2$	ug $SO_2/m^3$ $\times$ 3.82 $\times$ $10^4$
	CO	mg $CO/m^3$ $\times$ .873
	$O_3$	ug $O_3/m^3$ $\times$ 5.10 $\times$ $10^4$
	$NO_2$	ug $NO_2/m^3$ $\times$ 5.22 $\times$ $10^4$
Hidrocarburo	$CH_4$	ug $CH_4/m^3$ $\times$ 1.63 $\times$ $10^3$

Tomado de: Environmental Protection Agency, National Primary and Secondary Ambient Air Quality Standard, Federal Register 36 no. 84, part II, p. 8186-8201, Apr. 30, 1971, Washington, D. C.

\*- La conversión a Volumen, V, en ppm, se expresa a una atmósfera de presión, P, y a  $25^{\circ}C$  expresado en grados Kelvin, igual a  $273^{\circ}C + 25^{\circ}C = 298^{\circ}K$ , utilizando la ecuación ideal para un gas basada en las Leyes de Boyle y Charles:

$$pv = nRT; p = 1 \text{ atm}; n = 1 \text{ mole del gas}$$

$R = .08205$ , una constante que se expresa en litros  
- atmósfera por grado K por mole;

$T = 298^{\circ}K$ ;

$$n = g/M; g = \text{peso del gas en ug/m}^3$$

$M = \text{peso molecular del gas}; SO_2 = 64;$   
 $CO = 28; O_3 = 48; NO_2 = 46; CH_4 = 16.$

## Los contaminantes

Las concentraciones de contaminantes del aire que causan daño a la salud y a la vegetación, y afectan la visibilidad, pueden compararse con las normas informadas en el cuadro 1. Una concentración de .15 ppm de oxidantes tales como los hidrocarburos, ozono, aerosoles, causa irritación a los ojos, daño a la vegetación y reducción de la visibilidad; .25 ppm del bióxido de nitrógeno por una hora causa coloración en la atmósfera durante el día y 3 ppm por una hora causa constrictión de los bronquios; 30 ppm de monóxido de carbono por 8 horas o 120 ppm por una hora, interfieren con la transportación del oxígeno por la sangre; 1 ppm de bióxido de azufre por una hora o .3 ppm por 8 horas causa daño a la vegetación; 5 ppm por una hora causa restricción de los bronquios; .1 ppm de sulfuro de hidrógeno por una hora causa irritación a la vista, la nariz y los oídos; .5 ppm de etileno por una hora o .1 ppm por 8 horas causa daño a la vegetación; los particulados pueden reducir la visibilidad 5 millas cuando la humedad relativa es menos de 70%.

Los contaminantes causan también daño a los materiales. La presencia de ozono raja o agrieta la goma, debilita los tejidos y palidece los colores; el sulfuro de hidrógeno deslustra la plata; el humo ensucia la ropa lavada; los aerosoles ácidos destruyen las medias de nilón. La química de la corrosión se conoce bien. El hierro oxidado se protege con pintura resistente a la corrosión. Los alambres de los muelles de teléfonos hechos con una liga de cobre y bronce, afectados por concentraciones de nitratos en el polvo del aire de la ciudad de Los Angeles, funcionaron bien cuando se sustituyeron con una liga de cobre y níquel.

Los cinco contaminantes principales del aire son los gases: óxido de azufre, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno; los hidrocarburos y los particulados sólidos (cuadros 1 y 2).

### Oxidos de azufre (33)

El azufre existe en el aire como bióxido de azufre, sulfuro de hidrógeno, ácido sulfúrico y sales de sulfato. Cerca del 80% de las moléculas del bióxido de azufre en el aire son emitidas como sulfuro de hidrógeno y 20% aproximadamente como bióxido de azufre. El paso inicial del bióxido de azufre en el aire es su oxidación al trióxido de azufre que se disuelve en las gotas de agua para formar el ácido sulfúrico que reacciona para formar sales de sulfato como el sulfato de amonio. Cuando el aire contiene bióxido de nitrógeno y algunos hidrocarburos, el bióxido de azufre se oxida en una reacción fotoquímica y produce aerosoles que contienen ácido sulfúrico. El bióxido de azufre puede ser oxidado en gotas de agua que contienen amoníaco para producir el aerosol de sulfato de amonio; esta oxidación puede ser catalizada por iones metálicos como los de hierro y manganeso. El ácido sulfúrico y las sales de sulfato que existen en el aire forman aerosoles que son lavados por la lluvia o bajan por gravedad en un periodo estimado entre 5 días y dos semanas. En una isla como Puerto Rico, las sales de sulfato en las espumas del mar son traídas por los vientos.

El azufre circula globalmente entre la tierra, el mar y el aire. El sulfuro de hidrógeno que viene al aire es producido naturalmente por la materia orgánica descompuesta en la tierra y en el mar y por volcanes. El ácido sulfúrico que viene del aire puede producir más acidez en las aguas de los ríos y los lagos. En 1958, se observó valores ácidos de pH 5.0 en aguas de Holanda que se extendieron en 1962, a la Europa Central y al centro de Suecia.

### Los particulados

Los particulados, líquidos y sólidos, son muy complejos. Los mayores de 10 micrones de diámetro provienen principalmente de procesos mecánicos como la erosión y del material pulverizado o rociado. Los particulados entre 1 y 10 micrones (1 micrón = .0001 mm) de diámetro son más abundantes en la atmósfera; provienen de procesos mecánicos tales como polvos industriales y cenizas. Los particulados que fluctúan entre .1 y 1.0 micrón de diámetro contienen más de los productos de condensa-

ción donde predominan los aerosoles como el de sulfato de amonio. Poco se sabe de la naturaleza química de los particulados que tienen diámetros menor de .1 de micrón.

Los particulados de todas clases y tamaños poseen un número de propiedades físicas similares; crecen por condensación, absorben y desparraman la luz.

El vapor de agua en el aire tiene importancia para producir reacciones entre el gas y la partícula como se ha determinado para la reacción entre el gas amoníaco y la niebla de ácido sulfúrico en el aire que produce el aerosol de sulfato de amonio. Los contenidos de humedad, baja y alta en la atmósfera, influyen en la reacción.

El mecanismo principal que remueve los particulados del aire es la fuerza de gravedad. Los particulados con diámetro menor de .1 a 1 micrón se mueven en el aire, chocan con otras partículas y crecen por coagulación. Las partículas con diámetros hasta 10 micrones pueden permanecer en el aire por períodos largos cuando ocurren turbulencias. Las partículas se remueven del aire cuando chocan con los edificios, con los árboles y otras cosas. Las partículas del aire desparraman y reducen la luz solar que llega a la tierra y contribuyen a reducir la temperatura. La baja de la temperatura global es atribuida, por algunos, al aumento de concentraciones de particulados en el aire causados por los volcanes y las actividades del hombre.

#### El monóxido de carbono

El gas monóxido de carbono (CO) igual que el bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), no reacciona con otros gases y sustancias en el aire. Sin embargo; el CO es un contaminante peligroso en concentraciones altas porque reacciona con la hemoglobina de la sangre de los humanos y animales afectando la salud y causando la muerte por asfixia. El automóvil contribuye con más del 80% de las emisiones globales de CO con pequeñas cantidades que provienen de otros procesos de combustión. Reacciones fotoquímicas de hidrocarburos en una atmósfera poluta producen muy pequeñas cantidades de CO. Algunas plantas bajo un periodo de tensión producen el gas CO; algunos organismos marinos (siphonophores) pueden emitir un gran número de burbujas que contienen hasta 80% de CO. En los Estados Unidos, en sitios donde no se disipa el aire, se ha encontrado durante el periodo que duran los tapones de tránsito de vehículos de motor, una concentración de 100 ppm de CO.

El bióxido de carbono, (CO<sub>2</sub>) no es un gas contaminante; lo usan las plantas en el proceso de fotosíntesis; se le da importancia porque según aumenta su concentración en la atmósfera absorbe más rayos ultravioletas del sol, disminuye la radiación del calor de la tierra y la temperatura del aire tiende a aumentar. Un aumento de 10% de la concentración de CO<sub>2</sub> puede aumentar .5°C la temperatura del aire. El hombre genera una gran cantidad de CO<sub>2</sub> en los procesos de combustión que usan combustibles fósiles como el carbón, el aceite y el gas natural. Otros procesos naturales como la oxidación bacteriana del humus y la descomposición de los depósitos de turba contribuyen a la liberación del CO<sub>2</sub> a la atmósfera. El gas es producido también por la oxidación bacteriana de material vegetativo y animal muerto. Las personas, los animales y las plantas exudan por combustión bioquímica el CO<sub>2</sub> producido en los procesos metabólicos. Los mares intercambian también el CO<sub>2</sub> con la atmósfera. En los trópicos, el mar libera más CO<sub>2</sub> al aire; en otras zonas ocurre lo contrario.

#### Los hidrocarburos

El hombre produce como el 15% de las emisiones globales de hidrocarburos al aire; pero es el principal productor en las áreas urbanas donde estos compuestos de carbono e hidrógeno ejercen el efecto principal de contaminación en las reacciones químicas que producen la niebla y el humo, conocidas como "smog". Esta palabra inglesa es una combinación de otras dos; smoke (humo) y fog (niebla) usada hace varias décadas en Londres y ahora en Los Angeles, California, donde abunda la niebla

negra o humo negro. Los hidrocarburos se originan en procesos de incineración, evaporación de solventes industriales y de la combustión de carbón y madera. El contribuyente mayor al smog es la gasolina que queman los vehículos de motor; los que queman aceite diesel no producen mucho smog. Los hidrocarburos se originan también de emisiones naturales de los bosques en forma de terpenos, compuesto orgánico que también producen otras vegetaciones. La descomposición bacteriana de la materia orgánica del suelo produce grandes cantidades del gas metano. El aire está poluto con niebla negra cuando su análisis indica un contenido de .15 ppm o más, por una hora, como promedio del nivel oxidante.

### Oxidos de nitrógeno

Los óxidos de nitrógeno que se encuentran en el aire son tres: óxido nitroso ( $N_2O$ ), óxido nítrico ( $NO$ ) y el bióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ). El más abundante es el óxido nitroso que es relativamente inerte; no es producido por el hombre; tiene una concentración global en el aire de .25 ppm.

Los procesos de combustión son los que producen mayor cantidad de los óxidos de nitrógeno. La combustión convierte el nitrógeno del aire al óxido nítrico que es oxidado en el aire urbano, lentamente, por el oxígeno y rápidamente, por el ozono ( $O_3$ ) al bióxido de nitrógeno. Los procesos microbiológicos del suelo y los relámpagos contribuyen también a la formación del bióxido de nitrógeno. Este gas es un absorbente fuerte de la luz ultravioleta del sol y es lo que produce el smog en el aire poluto. Se combina también con el vapor de agua para producir el ácido nítrico y reacciona con amoníaco o las partículas del aire para formar sales de nitrato como el nitrato de amoníaco. La lluvia remueve, en alrededor de tres días, el exceso de los óxidos de nitrógeno que no reacciona fotoquímicamente para producir el smog.

### Métodos químicos

En 1971 EPA (17) publicó los métodos químicos oficiales recomendados para la determinación del bióxido de azufre, particulados, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno e hidrocarburos en el aire. En dicha publicación se discute la precisión, la concentración apropiada del contaminante para el método, la interferencia, el equipo necesario, el procedimiento, la calibración o eficiencia, los cálculos y también cita referencias.

El bióxido de azufre es absorbido del aire en una solución de tetracloromercurato (TCM) de potasio. Se forma un complejo de diclorosulfitomercurato que resiste la oxidación del oxígeno en el aire. Este complejo es estable a oxidantes fuertes como el gas ozono y los óxidos de nitrógeno. El complejo reacciona con pararosanilina y formaldehido para formar el ácido metil sulfónico de pararosanilina que tiene un color intensivo. La absorción de la solución es medida en un espectrofotómetro. El método es aplicable para medir concentraciones de bióxido de azufre en el aire en muestras tomadas hasta 24 horas. El reactivo absorbente es muy venenoso; si cae sobre la piel lávese con agua bajo la pluma. La preparación se hace disolviendo cloruro de mercurio y EDTA, la sal disódica del ácido etilenodiaminotetracético y cloruro de potasio, en agua, para producir el reactivo absorbente que es una solución .04 molar de TCM.

Los particulados se recogen en filtros de fibra de vidrio. El método para determinar monóxido de carbono en el aire se basa sobre la absorción de la radiación infrarroja por dicho gas. Los oxidantes fotoquímicos se determinan mezclando el aire con el gas etileno. El ozono del aire reacciona con el etileno y emite luz que es detectada en un tubo fotomultiplicador. La corriente fotoeléctrica es amplificada y medida directamente o marcada en un registrador. El gas bióxido de nitrógeno se recoge pasando burbujas del aire por una solución de hidróxido de sodio para formar el nitrito de sodio. El ión nitrito se determina colorimétricamente en reacción con una mezcla de soluciones de ácido fosfórico, sulfanilamida y NEDA, un compuesto orgánico.

## LAS AGUAS

El pueblo no puede vivir si falta el agua. "Y faltando agua al pueblo, se mancomunaron contra Moisés y Aarón. Y amotinados dijeron: ¿Por qué habéis conducido la asamblea del Señor al desierto para que muramos nosotros y también nuestros ganados? El señor habló a Moisés, diciendo: Toma la vara, y congregad al pueblo tú y tu hermano Aarón, y hablaréis a la peña en presencia de toda la gente, y de la peña brotarán aguas, de las que beberá todo el pueblo con su ganado. Tomó pues, Moisés la vara y habiendo alzado la mano y herido dos veces con la vara aquella peña, salieron aguas copiosas por manera que pudieron beber el pueblo y los ganados". (Antiguo Testamento, Números 20:1-11.)

El agua da nueva vida. "En verdad, en verdad te digo, respondió Jesús a Nicodemo, el fariseo, que quien no renaciera del agua y del Espíritu, no puede entrar en el reino de Dios". (Nuevo Testamento, Juan 3:5.) Se refería Jesús al bautismo, al agua que da nueva vida. Toda clase de vida: humana, animal, aves, peces, la flora y fauna terrestre y marina, depende del agua. El embrión flota en un líquido desde la concepción al nacimiento. Los procesos metabólicos del crecimiento requieren agua. El cuerpo humano contiene como 71% de agua.

Hipocrates (466-357 B. C.), médico griego, padre de la Ciencia Médica, recomendó filtrar y hervir el agua para proteger la salud. Los acueductos romanos almacenaban las aguas para que se depositaran los sedimentos. Sistemas de purificación eficientes son usados en los acueductos modernos.

Las aguas polutas afectan la salud, la recreación como el deporte acuático, el esquí acuático, la natación, la pesca, la estética del paisaje y dañan las cosechas y los alimentos.

Un cuerpo de agua es un sistema dinámico similar a una masa de aire; absorbe regularmente sólidos, líquidos y gases naturales o producidos por el hombre. Estas sustancias muertas y los organismos vivos en las aguas naturales, fluyen, se dispersan, reaccionan entre sí, física, química y biológicamente, hasta depositarse en un recipiente como el mar o en un receptor como los peces.

Puerto Rico cuenta con un ambiente de agua dulce en lagos y 30 ríos principales y otro ambiente marino de las aguas del Mar Caribe y el Océano Atlántico que descargan en nuestras costas, bahías y balnearios. Todas estas aguas están contaminadas, a menor o mayor grado.

La JCA de Puerto Rico publicó en 1971 y 1972 (19), dos informes que tratan sobre la contaminación del agua. Está preparando un reglamento más estricto que exige que se dé el tratamiento terciario, el más avanzado, a los desperdicios líquidos; requiere control muy específico para la contaminación termal incluyendo zonas de mezclas de agua caliente con la fría y no se permitirán descargas en las bahías luminiscentes.

### Normas de control

El Servicio de Salud Pública de los Estados Unidos recomendó en 1962, las normas de límites y máximos permisibles para 11 metales y 5 aniones; un total de 20 constituyentes químicos incluyendo también los límites para los caracteres físicos (cuadro 4). Las personas interesadas en estos métodos físicos, químicos y biológicos, para aguas, pueden referirse al libro publicado por la American Public Health Association (2). Los márgenes de normas para aguas que se usan para servicio doméstico se informan en el cuadro 5.

Cuadro 4- Normas de constituyentes químicos para aguas de beber adoptadas por el Servicio de Salud Pública de los Estados Unidos en 1962

Constituyentes	Límite Recomendado	Máximo Permisible
	(miligramos por litro)	
Alkyl bencina sulfonato (ABS) -detergentes o surfactantes (sustancias activas al azul de metileno)	.5	—
Arsénico	.01	.05
Bario	—	1.0
Cadmio	—	.01
Carbón-extracto con cloroformo (contaminantes orgánicos)	.2	—
Cloruro	250	—
Cromio (hexavalente)	—	.05
Cobre	1.0	—
Cianuro	.01	.20
Fluoruro	.8—1.7*	1.6—3.4*
Hierro	.3	—
Plomo	—	.05
Manganoso	.05	—
Nitrato (como $\text{NO}_3$ )	45	—
Fenólicos compuestos (como fenol)	.001	—
Selenio	—	.01
Plata	—	.05
Sulfato	250	—
Sólidos Totales	500	—
Zinc	5.0	—

\*- Los límites varían inversamente con la temperatura media anual

Los límites recomendados para los caracteres físicos son:

Color .....	15 minutos
Sabor .....	Aceptable
Olor (TON) ** .....	3
Turbidez .....	5 unidades

\*\*- TON- (Threshold odor number) - la mayor dilución de la muestra que da el olor menos perceptible.

Nota: Las aguas de beber contienen generalmente menos de .mg/1 de boro que se considera inofensivo para uso humano; rara vez contienen más de 1 mg/1 de boro.

Cuadro 5- Márgenes de normas para aguas que se usan para servicio doméstico

Constituyente	Agua excelente que solo requiere ser desinfectada	Agua buena que requiere el tratamiento usual y ser desinfectada	Agua pobre que requiere tratamiento especial o auxiliar y ser desinfectada
BOD* 5 días mg/l			
Promedio mensual	.75 — 1.5	1.5 — 2.5	más de 2.5
Máximo por día o muestra	1.0 — 3.0	3.0 — 4.0	más de 4.0
Coliforme MPN* por 100 ml	50.0 — 100	50.0 — 5,000	más de 5,000
Promedio mensual			
Máximo por día o muestra	Menos de 5% sobre 100	Menos de 20% sobre 5,000	menos de 5% sobre 20,000
Oxígeno Disuelto - D0*			
mg/l promedio	4.0 — 7.5	4.0 — 6.5	4.0
% saturación	75% o más	60.0% o más	—
pH, promedio	6.0 — 8.5	5.0 — 9.0	3.8 — 10.5
Cloruros, máximo, mg/l	menos de 50	50 — 250	más de 250
Fluoruros, mg/l	menos de 1.5	1.5 — 3.0	más de 3.0
Fenólicos compuestos			
Máximo, mg/l	nada	.005	más de .005
Color, unidades	0 — 20	20 — 150	más de 150
Turbidez, unidades	0 — 10	10 — 250	más de 250

\* - MPN - Most Probable Number.

BOD - Biochemical Oxygen Demand.

DO - Dissolved Oxygen.

## Las siglas BOD, COD, TOC

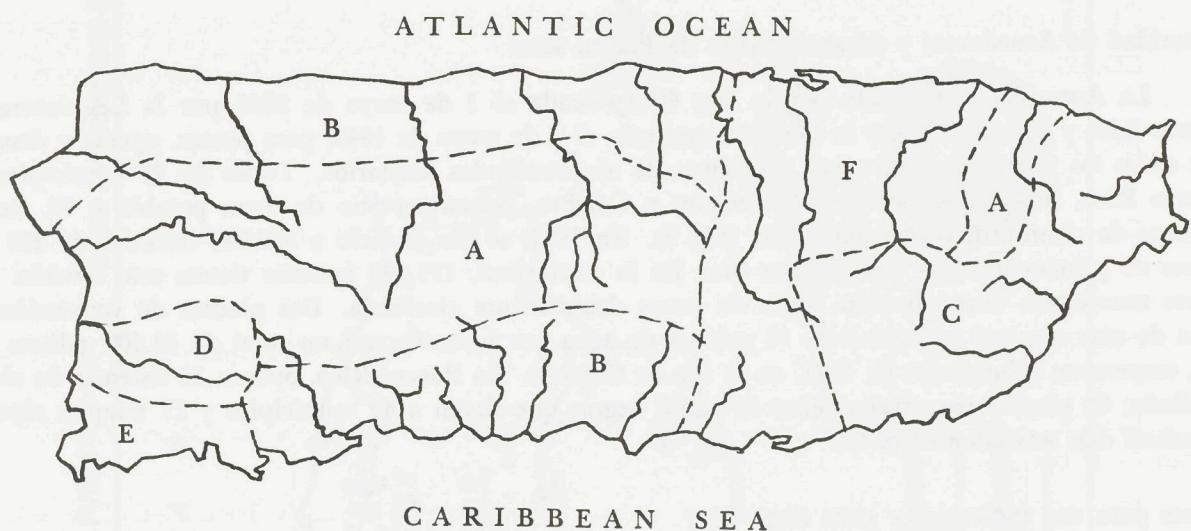
Estas tres siglas representan respectivamente las palabras en inglés: *Biochemical Oxygen Demand*, *Chemical Oxygen Demand* y *Total Organic Carbon*. Los procesos que degradan y convierten las sustancias solubles en las aguas polutas a otras formas físicas y químicas, son extremadamente complicados debido al efecto de la vida acuática, especialmente los microorganismos. No hay métodos químicos específicos disponibles para identificar las sustancias degradadas y los productos de la reacción en las aguas polutas. Hay que depender del parámetro BOD, que mide el peso del oxígeno disuelto utilizado por los microorganismos según se degrada o transforma el carbón y los compuestos nitrogenados a materia orgánica, en un periodo standard de incubación de 5 días controlado a 20°C + 1°C, excluyendo la luz para evitar la formación de oxígeno disuelto (OD) por las algas en las muestras. El método mide entre 70 y 80% del BOD de la muestra, lo que se considera razonable; nada dice de la clase de compuesto orgánico presente en el agua poluta o de los que son resistentes a la descomposición. La demanda de oxígeno en las aguas polutas es causada por tres clases de materiales: (a) - El material carbónico orgánico usado como alimento por los organismos aerobios; (b) - El nitrógeno oxidable derivado de nitritos, amonia y compuestos orgánicos nitrogenados que sirven de alimento a bacterias específicas (Nitrosomas y Nitrobacterias); y (c) -Algunos compuestos reductores como el hierro ferroso, los sulfitos y sulfuros, que reaccionan con el oxígeno molecular soluble. Los otros dos parámetros, COD y TOC, se usan para obviar algunas desventajas del BOD. El COD mide la demanda equivalente de oxígeno de la mayoría de los compuestos orgánicos que pueden ser oxidados a bióxido de carbono y agua con una mezcla hirviante de los ácidos crómico y sulfúrico; es decir, los compuestos orgánicos que se degradan biológicamente y de muchos otros que no lo son. El COD da valores mayores para la demanda de oxígeno que la prueba BOD. El otro parámetro, TOC, se basa en métodos recientes de combustión rápida del carbón y mide el bióxido de carbono liberado con el espectrómetro infrarrojo.

## Clases de aguas en Puerto Rico

El U. S. Geological survey (35) publicó en 1964, la clasificación de las aguas superficiales de Puerto Rico según la composición química de 112 muestras de aguas recogidas en los diferentes ríos (fig. 1). Los resultados indican que la composición de las aguas superficiales es similar; predominan los iones de calcio y bicarbonato. Las diferencias consisten en la concentración de sólidos disueltos y de iones específicos debido a las variaciones de geología. Muchas de las rocas que predominan en la zona B son calizas y en la zona D son serpentinita, rica en magnesio, que son más solubles en agua. Las rocas en las zonas A y F son tobas, arenisca y piedra de limo, que son menos solubles en agua. La roca granodiorita y sus asociados, ricas en sílica, predominan en la zona C; son las menos solubles en agua. En el valle de Lajas, en la zona E, hay agua salina atrapada en las profundas capas de arcilla que tienen poca permeabilidad. Los análisis hechos de las aguas subterráneas de pozos, en todo Puerto Rico, indican que estas aguas tienen una composición química similar. Calcio, magnesio y bicarbonato, son los iones principales, en la mayoría de las aguas subterráneas. Calcio y cloruro son los iones predominantes en las áreas costeras y en el valle de Lajas. El agua de un pozo de la isla de Vieques se difiere de las otras; predomina el sodio y el bicarbonato; probablemente es una mezcla de agua que corre por piedra caliza, diorita de cuarzo y otras rocas relacionadas. Las concentraciones de fluoruro, no más de .1 ppm (mg/l) y de nitrato, rara vez más de 2-3 ppm, son bajas en las aguas superficiales. Los fluoruros y nitratos son también generalmente bajos en concentraciones en las aguas subterráneas; la mayoría son aguas pesadas (100-300 ppm) predominantes en bicarbonato de calcio y magnesio y pueden tener sodio cuando están contaminadas con agua de mar.

El U. S. Geological Survey (34) ha publicado una inmensa cantidad de datos de análisis químico de las aguas superficiales y subterráneas de pozos para todo Puerto Rico. Incluye datos de descarga y de contenidos de sílica, hierro, calcio, magnesio, sodio, bicarbonato, carbonato, sulfato, cloruro, fluoruro, nitrato, sólidos, así como dureza, dureza no-carbonatada, conductividad eléctrica, pH, temperatura y color.

Fig. 1- Clasificación de las aguas superficiales de Puerto Rico en seis zonas según el análisis químico (tomado de la pág. 88, referencia (35)).



Análisis químico representativo

Zona	Sílica ( $\text{SiO}_2$ )	Dureza ( $\text{CaCO}_3$ )	Alcalinidad ( $\text{HCO}_3$ ) Partes por millón	Sulfato ( $\text{SO}_4$ )	Cloruro (Cl)	Sólidos Disueltos
A	26	83	99	7.2	10	145
B	24	170	194	4.8	8	212
C	37	39	66	4.4	12	117
D	26	190	208	15.0	12	221
E	24	260	360	78.0	100	582
F	28	104	121	10.0	18	165

La JCA (19) de Puerto Rico informa que se han encontrado altos niveles naturales de manganeso en las aguas del Lago Loiza.

#### Autoridad de Acueductos y Alcantarillados de Puerto Rico

La Autoridad fue creada por la Ley 40 aprobada el 1 de mayo de 1945 por la Legislatura de Puerto Rico y enmendada por la Ley 163 aprobada el 3 de mayo de 1949, para poseer, operar y desarrollar todos los yacimientos de aguas y sistemas de alcantarillados sanitarios. Todos los 77 municipios de Puerto Rico, incluyendo las islas de Vieques y Culebra, tienen servicio de agua potable y 76, tienen sistemas de alcantarillado en operación (fig. 2). En 1971, se dio servicio a 559,945 usuarios de 216 millones de galones de agua potable por día. En la zona rural, 175,000 familias tienen este servicio. Algunos municipios usan también aguas de pozos debidamente clorinada. Dos plantas de conversión de agua de mar con una capacidad de 10 galones de agua por minuto para un total de 14,400 galones por día, empezaron a funcionar en 1971, en la isla de Culebra. En Puerto Rico, operan 16 sistemas de alcantarillado; 64 plantas para tratamiento de aguas negras que sirven a 42 municipios y 27 tanques sépticos o Imhoff dan servicio a otros 27.

#### Aguas para uso industrial y para riego

El control químico para aguas de uso industrial puede variar de una simple prueba de color a determinaciones de una docena o más iones dentro de un margen de microgramos por litro (ug/l) para las operaciones supercríticas de calderas. Un sistema típico puede requerir solamente un análisis de cloruro y fósforo; otro sistema como el de una caldera a gran presión requiere análisis de alcalinidad, cloruro, cobre, hidrazina, sulfito, hierro, morfolina, pH, fosfato, sulfato y otros.

#### Aguas Duras

Las aguas que contienen sales de calcio y magnesio son pesadas. El grado de dureza se mide con una solución standard de jabón requerida para producir lavaza en un volumen definido de agua. El jabón es precipitado principalmente por los iones de calcio y magnesio; pero puede serlo también por otros metales polivalentes como aluminio, hierro, manganeso, estroncio y zinc y por los iones de hidrógeno. La dureza del agua se expresa en ppm o en granos por galón U. S.; un grano por galón es aproximadamente igual a 17.1 ppm. La dureza de las aguas es ocasionada por las sales de bicarbonato, sulfatos, cloruros y nitratos de calcio, magnesio, hierro y otros.

El agua con una dureza de 15 a 50 ppm se considera blanda; 50 a 100 ppm, medio blanda y 100 a 200 ppm, agua dura. El agua dura es buena para el riego de plantas; la que tiene menos de 150 ppm es preferible para uso doméstico. El agua blanda es buena para el laundry, para el lavado de platos y el baño; pero puede causar corrosión en las tuberías. Las aguas ácidas disuelven el hierro como bicarbonato; a veces se forma sulfato de hierro que es muy corrosivo y produce aguas rojas que tiñen la porcelana del baño y la ropa lavada.

La alcalinidad total, usando el indicador metileno anaranjado, determina la llamada dureza carbonatada; la dureza excedente se llama dureza no-carbonatada o permanente. La dureza carbonatada es temporera y puede eliminarse hirviendo el agua.

#### Aguas para riego

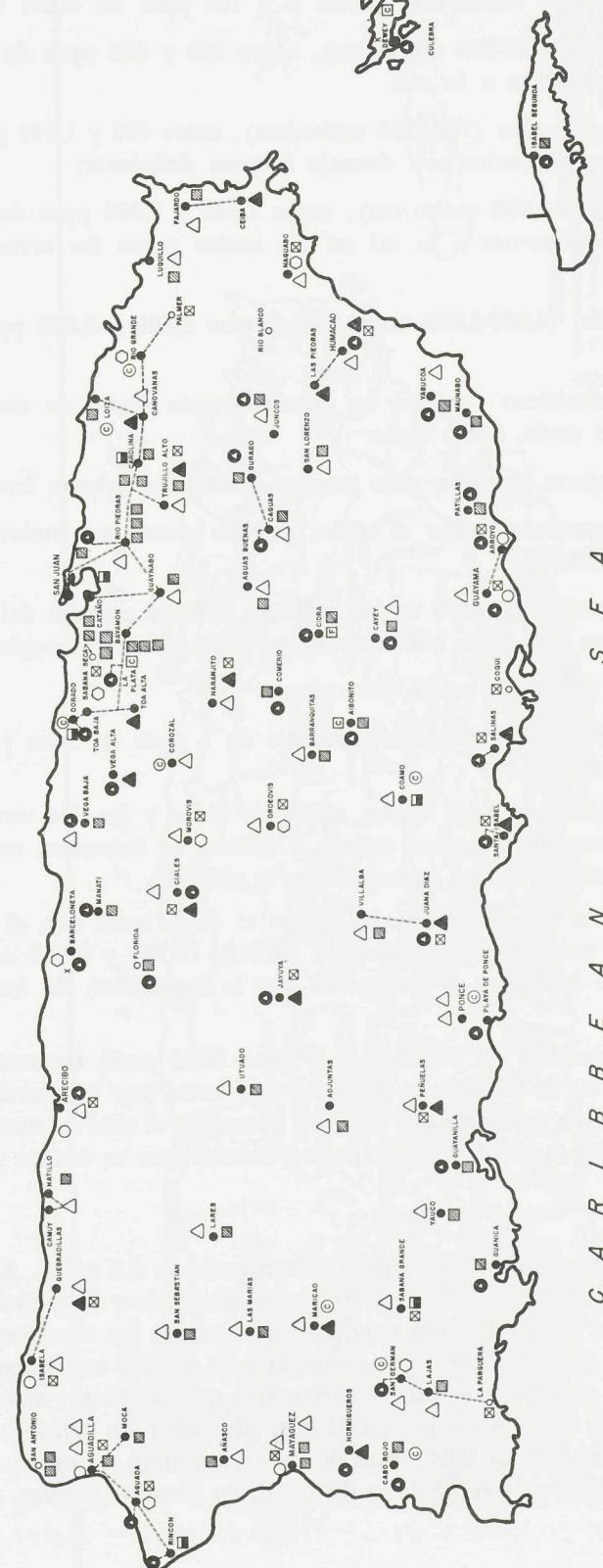
La calidad del agua para riego se determina por sus contenidos de sales, de sodio, de boro y de carbonato. El contenido de sal de la mayoría de las aguas de riego varía de .1 a 5 toneladas por acre-pie de agua, aproximadamente de 70 a 3,840 ppm. Las aguas de riego se clasifican en 5 grupos según

COMMONWEALTH OF PUERTO RICO

Fig. 2—SISTEMAS DE AGUAS Y ALCANTARILLADOS EN PUERTO RICO

WATER AND SEWERAGE SYSTEMS

A T L A N T I C O C E A N



C A R I B B E A N S E A

WATER	△ FILTRATION PLANT	● DEEP WELLS - CHLORINATION	— - - - - INTERCONNECTED SYSTEMS	□ PLANT UNDER CONSTRUCTION	PLANT TO BE CONSTRUCTED
SEWER	TREATMENT PLANT ■ SECONDARY ■ PRIMARY	▲ IMHOFF TANK	○ SEPTIC TANK	○ RAW DISCHARGE INTO THE OCEAN	○ SYSTEM UNDER CONSTRUCTION x 1971 = 72 □ FUTURE

WATER	△ FILTRATION PLANT	● DEEP WELLS - CHLORINATION	— - - - - INTERCONNECTED SYSTEMS	□ PLANT UNDER CONSTRUCTION	PLANT TO BE CONSTRUCTED
SEWER	TREATMENT PLANT ■ SECONDARY ■ PRIMARY	▲ IMHOFF TANK	○ SEPTIC TANK	○ RAW DISCHARGE INTO THE OCEAN	○ SYSTEM UNDER CONSTRUCTION x 1971 = 72 □ FUTURE

PLANT TO BE CONSTRUCTED

1971 = 72

□ FUTURE

REVISED AUGUST, 1971



VIEQUES

DESENLAMIN  
PLANT

CULEBRA



su salinidad expresada en término de Conductividad Eléctrica a 20°C, micromhos por centímetro (umho/cm), como sigue:

- C1- De salinidad baja (0-250 umho/cm), entre 0 y 160 ppm de sales; son buenas para riego;
- C2- De salinidad moderada (250-750 umho/cm), entre 160 y 480 ppm de sales; son buenas para regar cosechas tolerantes a la sal;
- C3- De salinidad moderada a alta (750-2250 umho/cm), entre 480 y 1,440 ppm de sales. No deben usarse para riego en los suelos con drenaje interno deficiente;
- C4- De salinidad alta (2,250-4,000 umho/cm), entre 1,440 y 2,560 ppm de sales. Se pueden usar para regar cosechas tolerantes a la sal en los suelos como los arenosos que tienen buena permeabilidad;
- C5- De salinidad muy alta (4,000-6,000 umho/cm), entre 2,560 y 3,840 ppm de sales. No deben usarse para riego.

Las aguas de riego se clasifican también en cuatro grupos según su contenido de sodio y su efecto en la condición física del suelo, como sigue:

- S1- Con sodio bajo; no afecta el suelo; pero pueden afectar los árboles frutales sensibles al sodio;
- S2- Medianas en sodio; pueden afectar el suelo; pueden usarse en suelos minerales y orgánicos con buena permeabilidad;
- S3- Altas en sodio; son perjudiciales al suelo; requiere manejo especial del suelo como buen drenaje, lavado frecuente con agua buena de riego, yeso y materia orgánica;
- S4- Muy altas en sodio; no deben usarse para riego.

Las aguas buenas para riego no deben contener más de 1 ppm de boro y no más de 1.25 me/l (.066 ppm) de carbonato de sodio.

Los métodos para el análisis químico de las aguas de riego y los dos monogramas que se usan para las clasificaciones respectivas de las aguas salinas y sódicas se informan en los Capítulos 5 y 12 del libro de Bonnet (6): "Edafología de los suelos salinos y sódicos".

En Puerto Rico, funcionan tres Distritos de Riego: el de la costa sur, el de Isabela al noroeste y el de Lajas al suroeste, que cubren respectivamente, 28,919, 19,769 y 6,888 acres, para un total de 55,575 acres según el mapa en la figura 3 preparado por la Autoridad de las Fuentes Fluviales de Puerto Rico.

Los canales de riego y muchos de los ríos de Puerto Rico están contaminados con el caracol, *Austrolordis Ladratif*, portador de la *Cercaria* o gusanito que entra por los poros de la persona que se baña en el río o con ducha de agua contaminada con este gusanito; el cual es transportado por la sangre hacia el hígado donde se deposita causando la enfermedad crónica que se conoce como Bilharzia.

#### Las aguas del mar

El porcentaje promedio de salinidad del agua de mar varía de 3.3 a 3.7. Las sales consisten principalmente de cloruro de sodio, cloruro y sulfato de magnesio, de calcio y de potasio, con algún bromuro. En los mares hay más sodio que magnesio, más magnesio que calcio; los cloruros abundan más que los sulfatos y los sulfatos más que los bicarbonatos y carbonatos. Los ríos contienen más calcio que magnesio, más magnesio que sodio, más bicarbonatos y carbonatos que sulfatos y más sulfatos que cloruros. El pH del agua de mar varía de 7.5 a 8.4 y la densidad es alrededor de 1.0243 a 20°C. Un pie cúbico de agua de mar contiene un promedio de 2.24 libras de sal y un galón, 48 onzas. La salinidad del agua de mar varía de sitio a sitio. El Gran Lago Salado de Utah, en Estados Unidos, tiene una salinidad de 28%, la mayor.

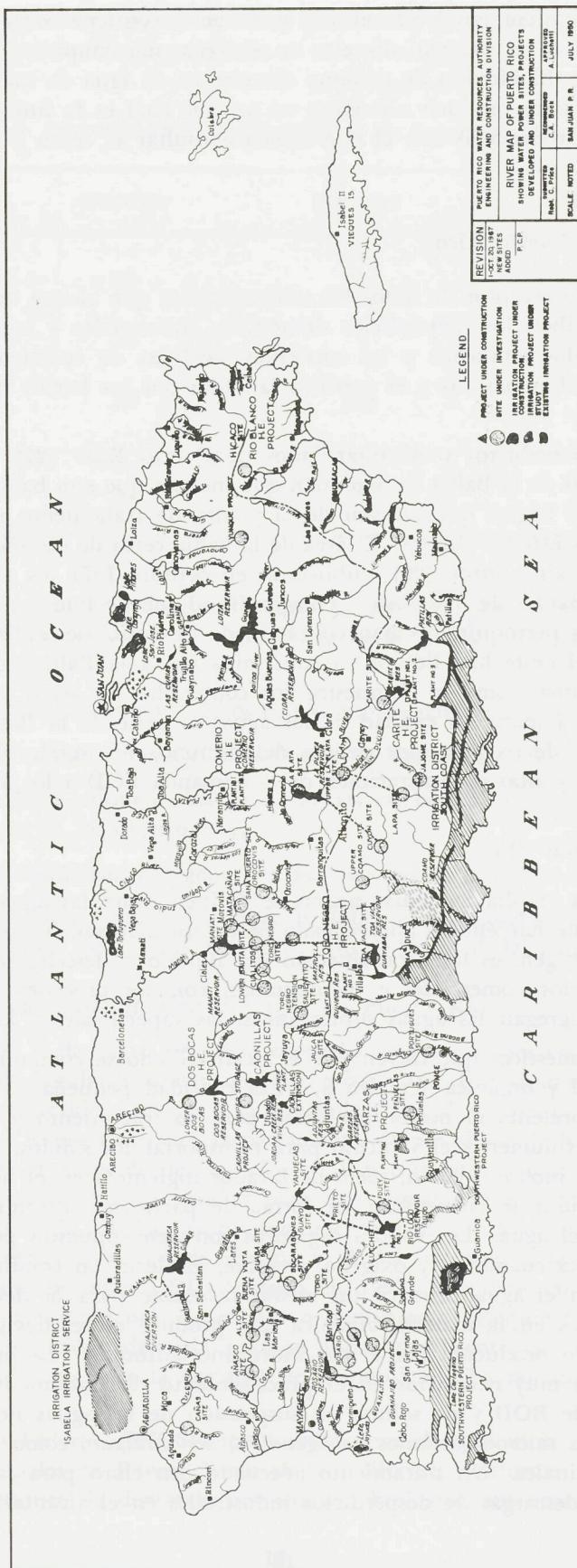


Fig. 3- Embalses de aguas en Puerto Rico para la producción de energía hidroeléctrica y/o servicio de riego y acueductos.

El mar tiene su atmósfera igual que el aire y el suelo; contiene oxígeno, bióxido de carbono y nitrógeno. Los peces respiran el oxígeno disuelto en el agua que chupan y asimilan por los capilares de sus branquias o agallas. El bióxido de carbono disuelto en el agua de mar es usado por las algas y las plantas verdes del mar para producir alimento; no se sabe cuál es la función del nitrógeno disuelto. Los interesados en familiarizarse más con el mar deben consultar el texto publicado en 1969 por Life Nature Library (21).

### Contaminación marina en Puerto Rico

El mar es un amplio receptor de todos los contaminantes que vienen de la tierra y del aire. Las costas de Puerto Rico reciben los desperdicios domésticos, industriales y agrícolas así como las aguas negras de los alcantarillados sanitarios y las corrientes cargadas de sedimentos minerales que fluyen por los ríos hacia el mar. Las basuras y el petróleo lanzados por los barcos también se depositan en el océano.

La Autoridad de Acueductos y Alcantarillados de Puerto Rico (27) publicó para 1968-69, un Survey con análisis de aguas de la Bahía de San Juan que indican que esta bahía está contaminada debido principalmente a las aguas negras que afluyen de la planta de tratamiento para éstas, localizada cerca de la Estación Naval de los Estados Unidos. El área de la bahía cerca de Cataño está relativamente limpia comparada con el resto. Lair y otros (20) publicaron en octubre 1971 los resultados de la contaminación de las aguas de las Bahías de Tallaboa y Guayanilla al sur de Puerto Rico. Encontraron que los desperdicios de las plantas petroquímicas han contaminado la Bahía de Tallaboa y que el flujo de las corrientes marinas hacia el oeste han llevado la contaminación a la Bahía de Guayanilla. La contaminación es de origen orgánico como lo demuestra los contenidos de aceite, grasa, fenoles y nitrógeno amoniacial, en las aguas del mar. La calidad de las aguas al oeste de la Bahía de Tallaboa ha degradado; hay concentraciones de oxígeno por debajo del mínimo, 4.5 mg/l, temperaturas en exceso del aumento requerido de 4°F y altas concentraciones de la demanda BOD a los 5 días (máximo, 7.6 mg/l).

### Tratamiento de aguas negras (15)

En su acepción más amplia las aguas negras se definen como las aguas restantes de las suministradas a una población, que habiéndose aprovechado para usos diversos, han quedado inservibles. Desde el punto de vista de su origen, es una combinación del líquido o desechos arrastrados por el agua de las casas habitadas, edificios comerciales e instituciones, con los procedentes de los establecimientos industriales a los que se agregan las aguas subterráneas, las superficiales y las de lluvia, nieve, etc.

Los desperdicios domésticos que fluyen por el alcantarillado se componen de 99% de agua y 1% de materia sólida, mineral y orgánica (cuadro 6). Esa cantidad pequeña de materia sólida que puede fluctuar entre .1 y 1%, presenta el mayor problema para su tratamiento y disposición adecuados. El agua provee solamente el volumen y el vehículo para transportar los sólidos. La materia sólida se compone de excreta, papel de inodoro, jabón, sucio de lavados higiénicos en el hogar y desechos de los alimentos, etc. Algunos sólidos se encuentran en forma de partículas ultramicroscópicas coloidales que permanecen dispersas en el agua. Los sólidos orgánicos son descompuestos por bacterias saprófitas que viven de la materia muerta cuando hay oxígeno presente; es decir, en condiciones aerobias. La ausencia de oxígeno soluble en el agua produce un medio favorable para la descomposición por bacterias anaerobias de las proteínas en la materia orgánica que produce olores desagradables. El más notable es el olor a huevo podrido producido por el gas hidrógeno sulfurado. La presencia de oxígeno y bacterias aerobias activas son muy necesarios en el procedimiento de tratamiento para bajar a un límite eficiente los porcentajes de BOD y de sólidos en suspensión de las aguas negras. Los desperdicios domésticos contienen además microorganismos patógenos al ser humano, como el tifus, disentería y otras enfermedades gastro-intestinales. Un tratamiento adecuado con cloro para las aguas negras mata estas bacterias patógenas. Las descargas de desperdicios industriales en el alcantarillado son nocivas, corrosi-

vas, inflamables y explosivas; son perjudiciales a las plantas de tratamiento de las aguas negras y no deben permitirse sus descargas en el alcantarillado.

Cuadro 6- Porcentaje típico de los sólidos de los desperdicios domésticos.

Clase	Orgánicos	Minerales	Total
Sedimentables	13	6	19
Suspendidos o Coloidales	18	7	25
Disueltos	20	36	56
Total	51	49	100

Los tratamientos en las plantas de aguas negras pueden ser primarios, secundarios o terciarios, según la combinación de los procesos que se usan. En general, el tratamiento de los desperdicios consiste de los siguientes procesos:

- 1- Separar la materia suspendida por medios físicos usando parrillas, tanques de sedimentación, etc.;
- 2- Destruir la materia orgánica por acción biológica de bacterias aerobias y tratamientos químicos;
- 3- Transformar los sólidos sedimentados en sustancias estables e inertes mediante acción biológica de bacterias aerobias en los digestores y;
- 4- Destrucción de los organismos patógenos en las descargas de la planta con la aplicación de cloro.

Las personas interesadas en obtener mayor información sobre el tratamiento para aguas negras pueden referirse al Manual preparado en 1964 por el Departamento de Sanidad del Estado de Nueva York (15).

#### Normas para el control de la contaminación del agua en Puerto Rico

La Ley Núm. 142 del 1 de mayo del 1950 otorgaba poderes al Secretario de Salud de Puerto Rico para vigilar, planificar, regular y tomar medidas para evitar la contaminación de las aguas. En 1970 estos poderes fueron transferidos por Ley a la Junta de Calidad Ambiental. Las aguas interestatales y costaneras se rigen por el Reglamento del Departamento de Salud de P. R. núm. 131 adoptado en 1967. Requiere que todas las fuentes de desperdicios reciban tratamiento secundario o equivalente, con ciertas excepciones, y establece normas de calidad para estas aguas. Se establecen cinco niveles de calidad para: 1- La preservación de las bahías bioluminescentes; 2- El desarrollo de moluscos y pesca; 3- La natación; 4- La propagación de la vida marina y; 5- La industria (fig. 4). Las aguas interestatales están sujetas al Reglamento núm. 129 adoptado en 1967. Requiere también que las aguas que acarrean desperdicios reciban tratamiento secundario o equivalente. Requiere que todas las aguas del interior se mantengan en condición adecuada para su uso como fuente de abastecimiento público de agua potable. Se requiere permiso para la descarga de desperdicios. La reglamentación de Puerto Rico satisface las guías federales.

El Servicio Geológico Federal (USGS) opera un sistema de vigilancia bioquímica que cubre 18 áreas en los drenajes principales de Puerto Rico; mide coliforme, coliforme fecal y oxígeno disuelto, la demanda por oxígeno químico, la demanda por oxígeno biológico, nutrientes (fósforos y nitratos)

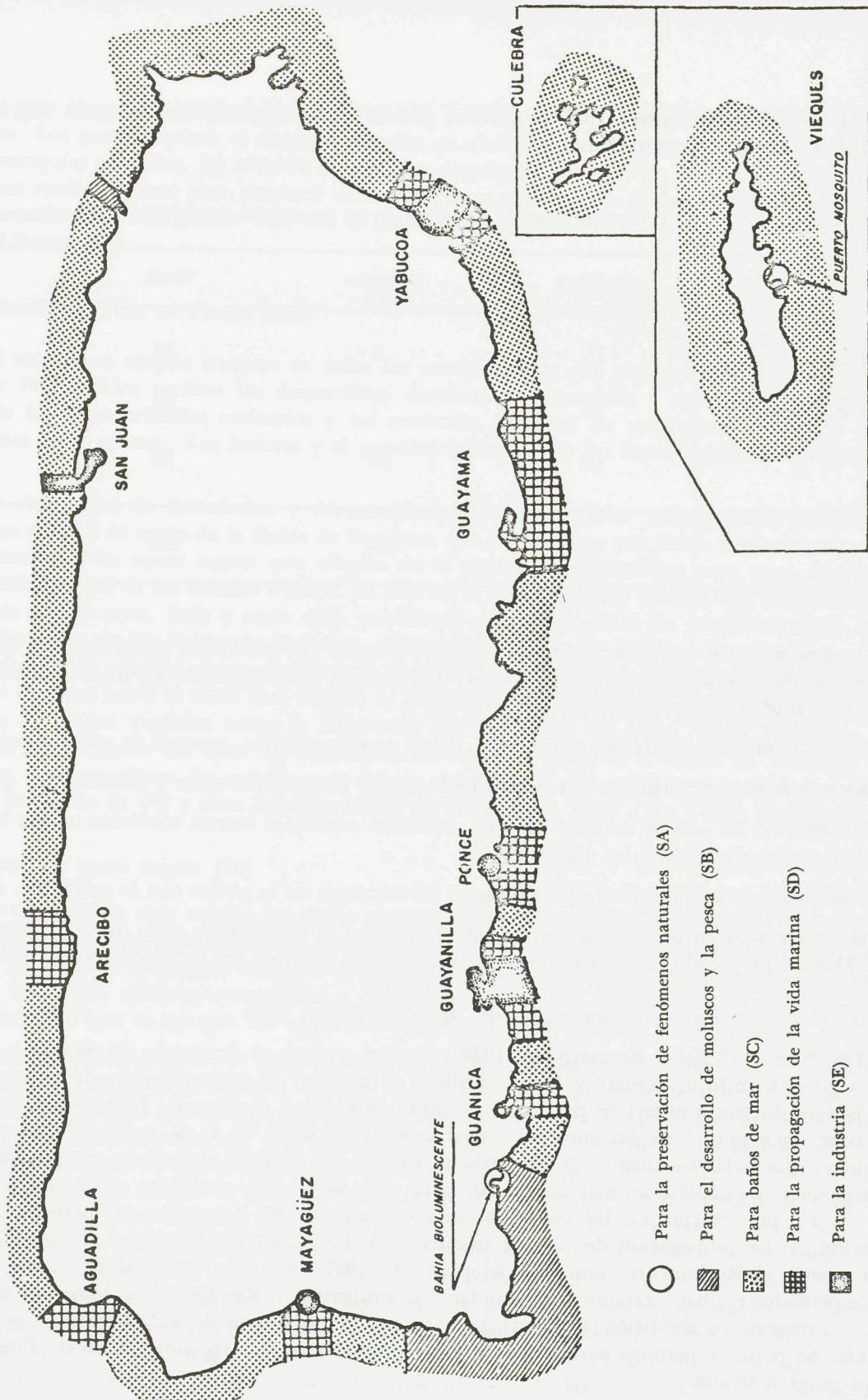


Fig. 4- Normas sobre la calidad de las aguas costaneras de Puerto Rico. Tomado del Informe Ambiental de 1971 de la JCA ( ).

- Para la preservación de fenómenos naturales (SA)
- Para el desarrollo de moluscos y la pesca (SB)
- Para baños de mar (SC)
- Para la propagación de la vida marina (SD)
- Para la industria (SE)

FUENTE: Derivadas de las especificaciones  
reglamento número 131.

NORMAS SOBRE CALIDAD DE LAS AGUAS COSTANERAS  
(Como fueron establecidas por el reglamento número 131 del  
Departamento de Salud, 1967)

y pH. Se mide la contaminación causada por plaguicidas en 71 estaciones. El Departamento de Salud de P. R. mantiene alrededor de 200 estaciones de vigilancia de agua potable y posee un laboratorio móvil. Mantiene también 20 estaciones de vigilancia en la costa donde se mide la demanda biológica de oxígeno, demanda química de oxígeno, oxígeno disuelto, pH, temperatura y coliforme.

#### Eutroficación

Eutroficación o muerte de los lagos es el proceso por el cual se reduce el volumen de éstos y otras fuentes fluviales debido a la acumulación de sedimentos producto de la erosión terrestre acompañado por el enriquecimiento de nutrientes esenciales que contribuyen al crecimiento y expansión de la vegetación acuática. Los lagos profundos tienen originalmente muy poca vida biológica; se van sedimentando con el tiempo reduciendo su profundidad y tornándose más productivos biológicamente. Luego se convierten en una ciénaga y por último a terreno firme. Estas etapas avanzadas de eutroficación se observan en la Laguna de Cartagena al suroeste de Puerto Rico y en el lago Cidra. Los detergentes, fertilizantes, excrementos humanos y animales aceleran el proceso. La vegetación acuática más estimulada son las algas, jacintos y otras; reducen el área de agua disponible para la navegación, ensucian el área de flotación de los barcos, reducen el caudal de agua disponible en las represas que surten los acueductos y las plantas hidroeléctricas, así como la velocidad de las aguas en los canales de riego y/o drenaje. Los jacintos han invadido las orillas de los Lagos Carraízo y Caonillas y los canales de riego en Puerto Rico. La Junta de Calidad Ambiental no permite el uso de sulfato de cobre y del compuesto orgánico, 2, 3- dicloronaftoquinona, para erradicar la vegetación acuática. La vegetación muerta hay que removerla del cuerpo acuático donde habitan peces para evitar demanda y agotamiento del oxígeno soluble en el agua, por el BOD que causa la muerte de la fauna. Hay que usar maquinaria especial que aumenta los gastos.

Los nutrientes usados en grandes cantidades por la vegetación acuática son: Carbón, hidrógeno, oxígeno, potasio, calcio, magnesio, nitrógeno y fósforo, así como vestigios de otros nutrientes orgánicos e inorgánicos. La medida de la eutroficación y sus efectos no son de fácil control; requiere medios químicos, físicos y biológicos, muy complejos; ya que los nutrientes son traídos en forma soluble o en sedimentos por los arroyos, la lluvia, los lavados urbanos, y las aguas de drenaje. Los pájaros, los animales muertos, la excreta, el orín y el nitrógeno fijado por las bacterias del suelo, son otras fuentes de enriquecimiento. El proceso de eutroficación es afectado por muchos factores tales como la temperatura, la turbulencia, las toxinas en el agua y la influencia de los organismos en el crecimiento de otros.

El proceso de eutroficación requiere más investigación para desarrollar un método tecnológico y práctico que contribuya a reducir el nitrógeno y fósforo en las aguas que en muchos casos son factores limitativos para el crecimiento de las plantas acuáticas. Las algas azul-verde pueden fijar el nitrógeno del aire; la falta de fósforo soluble en el agua limita su actividad. La Sociedad Americana de Química (1) informa que los análisis hechos de las aguas de 17 lagos del Estado de Wisconsin en los Estados Unidos indican un contenido de .015 mg/1 de fósforo inorgánico y .3 mg/1 de nitrógeno inorgánico, que son los límites que hacen florecer las algas. En otros lagos las algas crecen excesivamente a niveles inferiores de fósforo y de nitrógeno. Las algas pueden también acumular fósforo en exceso para sus necesidades metabólicas. Falta por obtener más información sobre los contenidos de fósforo y nitrógeno inorgánico solubles en las fuentes fluviales de Puerto Rico. La remoción del fósforo en los detergentes domésticos se ha propuesto para reducir el contenido de fósforo en las aguas. Un detergente que no tiene fósforo, el ácido nitrilotriacético, se ha estudiado y considerado para desplazar los que contienen fósforo. La Asociación Americana de Química (1) informa que al nivel nacional de Estados Unidos se pueden remover de las aguas 280 millones de libras de fósforo por año, si se eliminan los detergentes que contienen fósforo; pero por lo menos 680 millones de libras de fósforo por año seguirán entrando de otras fuentes. Los contenidos de molibdeno, hierro y otros nutrientes, en las aguas pueden ser también factores limitativos para el crecimiento de las plantas acuáticas.

### Otras fuentes que contaminan las aguas

Los desperdicios de las lecherías, corrales y pastizales para el ganado, son la fuente principal de contaminación orgánica agrícola. En Puerto Rico se consideran equivalentes a los desperdicios de 6 millones de personas. Los nitratos de los fertilizantes, contrario a los fosfatos que son fijados por los coloides del suelo, son muy susceptibles a ser lavados por las lluvias y penetran hasta las aguas del subsuelo. Las concentraciones altas de nitrato en el agua causan metamoglobinemia infantil conocida con el nombre, bebé azul. Los análisis de aguas hechos por el Servicio Geológico Federal y EPA, en Puerto Rico, han revelado alguna contaminación ocasionada por pesticidas.

El volumen de sólidos suspendidos que llegan a las aguas de Puerto Rico arrastrados por la erosión es probablemente varios cientos de veces mayor que el total de aguas negras descargadas. Los terrenos en barbecho, en preparación para la siembra o en las primeras etapas de crecimiento de la cosecha, sin protección por cubierta vegetal, aumentan la tasa de la erosión de 4 a 9 veces. Un informe federal en 1969 estimó que el promedio de sedimento producido durante una lluvia torrencial en lugares con carreteras en construcción fue alrededor de 10 veces más que en el terreno cultivado, 200 veces más que en las áreas cubiertas de hierba y 2,000 veces más que en los bosques.

El peligro de contaminación de las aguas subterráneas requiere que se prohíba el uso de pozos de inyección que usan varias industrias para disponer de los desperdicios incluyendo algunos tóxicos.

Muchos derrames de petróleo contaminan las aguas de todos los mares. En 1968 la rotura del barco-tanque Ocean Eagle contaminó con petróleo la Bahía de San Juan y sus balnearios. Los desperdicios de las embarcaciones, las descargas de las plantas de energía, los derrames de aceites y gasolina contribuyen también a la contaminación.

### EL MOSTO, SUBPRODUCTO DEL RON, CONTAMINANTE DIFÍCIL DE TRATAR

En 1970 se usaron 17 millones de galones de mieles de las producidas en la industria azucarera de Puerto Rico como medio de fermentación con levaduras específicas para producir 15.5 millones de galones, grados prueba, por envejecimiento de nuestro famoso ron que produjo ese año \$100 millones de impuestos al Gobierno Estatal.

La Srta. Zulma Ayala (3) ha informado la composición promedio del mosto (cuadro 7). La producción de los espíritus destilados en 1970 descargaron 75 millones de galones de mosto que es un con-

Cuadro 7- Constituyentes y concentración promedio del mosto, subproducto de la industria del ron (3).

Constituyente	Concentración
pH	4.7
BOD, 5 días a 20°C	28,620 mg/l
COD	92,224 "
Azúcares totales	1.6%
Ácidos volátiles	1,287 mg/l
Sólidos totales	89,273 "
Sólidos volátiles	63,982 "
Sólidos fijos	25,291 "
Sólidos suspendidos	3,224 "
Cl <sup>-</sup> ión	2.75%

taminante difícil de descomponer por tratamiento químico-biológico. El mosto es causa de un problema ambiental; produce mal olor, color pardo indeseable en las aguas claras y tiene un valor alto de BOD que en relación con el equivalente de población se compara a una descarga no tratada de cerca de un millón de personas. Las industrias de ron en Puerto Rico lanzan los mostos al mar con excepción de una que lo tira a una laguna y luego a otra de donde se usa el agua para riego.

Hasta la fecha no se ha logrado un proceso económico para descontaminar el mosto. Su alto contenido de hidratos de carbono que producen ácidos orgánicos, su valor pH bajo, la temperatura alta de destilación que le da un color de caramelo y lo hace espumoso, su alto valor de BOD y de sólidos volátiles, son caracteres importantes que deben tomarse en consideración en cualquier proyecto diseñado para descontaminarlo. Hay que buscar las clases de bacterias aerobias específicas que sean eficientes para descomponerlo. El valor BOD (cuadro 7) debe reducirse a 2,000 mg/l o menos. Los azúcares residuales del mosto y sus minerales que descargan a una laguna o río, son buenos nutrientes para que las bacterias aerobias crezcan y se propaguen para reducir el valor BOD. Las bacterias del mar no causan problema; los nutrientes del mosto promueven el crecimiento de las algas que causan problemas en las playas y en las aguas de mar que se usan para enfriar las aguas calientes que descargan los condensadores usados en las industrias.

En un proceso anaeróbico biológico es necesario convertir los ácidos orgánicos del mosto a los gases metano y bióxido de carbono usando bacterias de clases específicas que producen metano (3). Estas bacterias crecen con lentitud en la presencia de componentes inhibidores como el oxígeno, el exceso de ácido, la alcalinidad alta y concentraciones de cationes altas: calcio, magnesio, potasio, cobre, hierro y exceso de amoníaco. Requieren temperaturas de 30 a 35°C y pH controlado entre 6.8 y 7.2 para funcionar con eficiencia.

## DESPERDICIOS SÓLIDOS

En 1972, la JCA de Puerto Rico informó que la basura que se recoge cada día en Puerto Rico pesa un promedio de 5.7 millones de libras; más de dos libras por persona. Los desperdicios sólidos se calculan en 2,895,000 toneladas por año a un costo de \$3,147,000. En 76 municipios se quema más de un 60% de la basura en 65 vertederos abiertos, pequeños, que cubren en su mayor parte 5 acres o menos; hay uno de 19 acres. El mayor, el de San Juan, cubre 193 acres. El cañón de San Cristóbal, un paisaje natural muy atractivo, se usa como vertedero en los municipios de Aibonito, Barranquitas y Orocovis. Hay 18 vertederos a lo largo de los ríos. El Departamento de Salud considera que la mitad de los vertederos son fuentes de contaminación del agua. Un censo realizado en 1969 demostró la existencia de 1,344 mini-basureros a lo largo de las carreteras principales, en solares yermos y otros sitios que son vulnerables al fuego. Estos son focos de moscas y ratas y contribuyen a contaminar las aguas. La quema de los desperdicios en estos vertederos y mini-basureros contamina el aire.

### Relleno sanitario e incineración

La basura se quema en un relleno sanitario bien planificado; los desperdicios se cubren con tierra; son una innovación en Puerto Rico. El de San Juan comenzó en 1958; los de Bayamón y Aguadilla en 1969, los de Caguas, Cidra y Cayey, en 1970. El de Cayey ha sido sumamente exitoso.

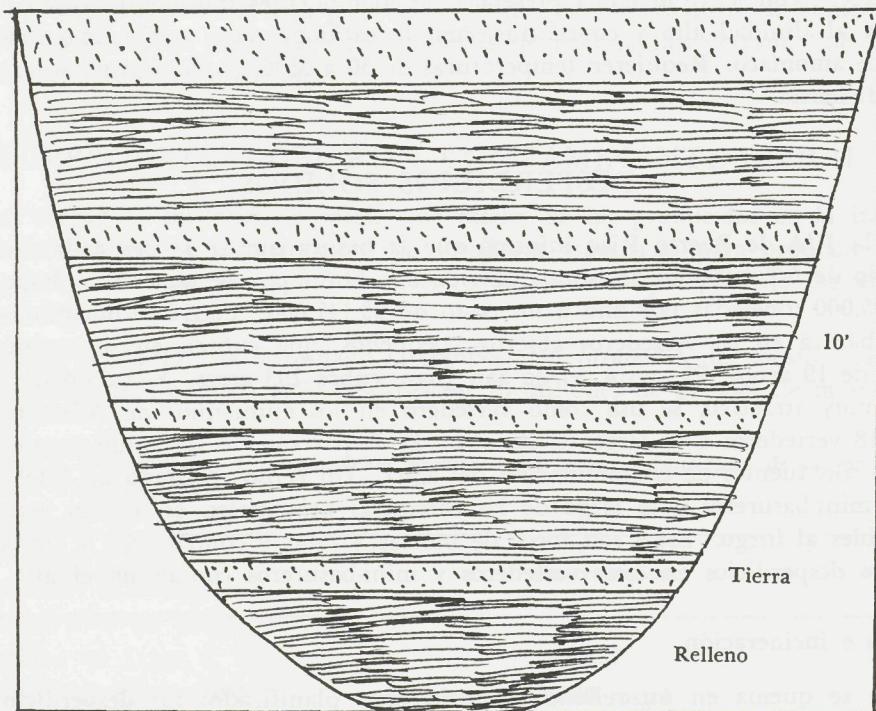
El objetivo del relleno sanitario es reducir el volumen y el peso de los desperdicios; un volumen inicial de 7 yardas cúbicas por tonelada puede reducirse a una tercera parte.

La Asociación Americana de Química (1) ilustra cómo se prepara el relleno sanitario en la ciudad de Los Angeles, California (fig. 5). Un relleno sanitario bien preparado no permite mucha entrada del aire; el oxígeno atrapado es usado rápidamente por los microorganismos aerobios para descomponer la materia orgánica. El proceso de descomposición de la materia orgánica por organismos anaerobios empieza cuando se agota el oxígeno disponible; se producen los gases metano y bióxido de carbono. Datos experimentales indican que la descomposición de la materia orgánica, principalmente

la aerobia, ocurre en los primeros 60 días. Todo el proceso puede tardar dos años o más. Algún metano se escapa a la superficie del relleno en concentraciones bajas que no afectan las áreas recreativas si hay buena ventilación. Los edificios pueden atrapar el metano y causar peligro de explosión. No es recomendable construirlos sobre o cerca del relleno sanitario porque su peso asienta más el relleno y la construcción no se estabiliza con firmeza. Este tiende a bajar y puede venir el derrumbe. Se ha recomendado bombear aire dentro del relleno para aumentar la actividad de las bacterias aerobias, pues el asentamiento es más rápido, se aumenta la capacidad del hoyo, se elimina el riesgo de explosión por metano y se reclama el sitio con más rapidez para ser usado como se desea.

Los condominios modernos, algunos edificios del Gobierno Estatal y Federal y las empresas industriales, usan incineradores para quemar la basura. De 85 a 90% de la materia se quema. La temperatura del horno fluctúa entre 1400 y 1800°C. Los gases liberados: bióxido de carbono, monóxido de carbono, bióxido de azufre y óxidos de nitrógeno contribuyen a contaminar el aire.

Fig. 5- Método moderno para preparar el relleno sanitario usado en Los Angeles, California.  
Vea referencia (1).



El relleno se esparce en capas finas en el hoyo. Cada capa se afirma con máquina hasta llegar a una altura de 10 pies. Se cubre con una capa de tierra limpia que es también apisonada. Se repite la operación. La capa superficial del relleno se cubre con 2 ó 3 pies de capas de tierra que son apisonadas. Un relleno sanitario hecho a la medida no tiene problemas de fuego, olores, moscas y ratas. El clima de Los Angeles es semitropical árido; llueve un promedio anual de 14.68 pulgadas; por lo tanto; hay poco riesgo de contaminación de las aguas. Este procedimiento se usa para reclamar tierras baldías y convertirlas en áreas recreativas como parques, campos de golf y otros usos.

## LOS SUELOS Y SU AMBIENTE

El suelo es un sistema o recurso natural dinámico igual que el aire y las aguas. Consiste de una mezcla de aire, agua, sólidos minerales y orgánicos muertos y microorganismos vivos y activos. Las reacciones físicas, químicas y biológicas que ocurren continuamente en los suelos le imparten dinamismo. Ningún estado del suelo constituye pureza absoluta como en el caso del aire y las aguas. No se puede establecer una norma y patrón para un suelo puro, descontaminado; pero se puede observar, estudiar, clasificar, determinar si es fértil o estéril y su uso adecuado. Se acusa al suelo de ser un contaminante de las aguas, del aire y de las cosechas. Lo es así cuando los factores naturales y el hombre alteran adversamente su medio ambiente natural en la relación normal: suelo-aire-agua-plantas.

Qué es el suelo, cómo se forma, cuál es su composición y cómo se clasifica e identifica con su nombre son tópicos de interés. Mencionamos aquí, a vuelo de pájaro, algunos factores importantes de la relación suelo-planta-contaminación ambiental. Los interesados en familiarizarse más a fondo con los conceptos físicos, químicos, mineralógicos y biológicos relacionados con el uso, manejo y conservación de los suelos pueden referirse a los textos de Bonnet (8) y de Buckman y Brady (12).

## LA CIENCIA DEL SUELO

La Ciencia del Suelo se divide en dos: *Pedología* que estudia el origen, la clasificación, la cartografía y la descripción de los suelos en su ambiente natural, y la *Edafología* que estudia la influencia de los suelos sobre los seres vivientes, particularmente las plantas, incluyendo el manejo y uso de los suelos relacionados con el crecimiento de las plantas. La Ciencia del Suelo es joven; producto de este siglo XX; se originó en Rusia en su fase pedológica y tomó cuerpo con la ayuda de especialistas americanos e internacionales después de la primera guerra mundial en 1918.

### Definición del suelo

En 1965 el Comité de Glosario de la Sociedad Americana de la Ciencia del Suelo define el suelo en dos acepciones: una simple y otra más científica: 1- "El material mineral no consolidado sobre la superficie inmediata de la tierra que sirve como un medio natural para el crecimiento de las plantas"; y 2- "La materia mineral no consolidada sobre la superficie de la tierra que ha sido expuesta e influída por los factores genéticos y ambientales, a saber: el material matriz, el clima incluyendo los efectos de la humedad y la temperatura, los macro y microorganismos y la topografía, todos actuando en un periodo de tiempo y dando como resultado un producto, el suelo, el cual difiere del material de donde se deriva en cuanto a muchas propiedades físicas, químicas y biológicas y también en sus caracteres". Los factores genéticos y ambientales que han sido activos en la formación de las miles de clases de suelos en el mundo en zonas climáticas variables, de frías a calientes, son cinco: Roca matriz, clima, organismos, topografía y tiempo.

### Meteorización

Meteorización o Edafización mejor conocido en inglés por el término "weathering", se refiere al proceso de todos los cambios físicos y químicos producidos en o cerca del suelo por los factores atmosféricos: temperatura, lluvia, hielo y viento. La roca matriz meteorizada convertida en material no consolidado conocido como, el regolito, puede ser de origen ígneo o volcánico, metamórfico o sedimentario. Las rocas ígneas son formadas por la solidificación o el enfriamiento de la magma o rocas fundidas en el interior de la Tierra al ser expulsadas por los volcanes en la lava que fluye al exterior. Ejemplos: el granito, la diorita, el basalto y las andesitas. Las rocas sedimentarias son formadas por los depósitos y la cementación de fragmentos de rocas ígneas meteorizadas por la acción del viento, el agua y el hielo o por rocas de origen orgánico o marino. Ejemplos: la arenisca, los esquistos endurecidos o compuestos

de cenizas volcánicas, arcillas o material calcárea, la piedra caliza, la dolomita, los conglomerados de grava marina o fluvial cementada, la lignita y el carbón. Las rocas metamórficas son formadas de las otras rocas debido a la acción combinada de las presiones fuertes, las temperaturas altas y el agua de lluvia; Ejemplos: el gneis, la cuarzita, la pizarra y el mármol.

Los procesos químicos o fuerzas químicas edáficas que son activos en el proceso de meteorización son seis: hidrólisis, hidratación, carbonatación, oxidación, reducción y solución, descritos en el libro de Bonnet (8).

Los micro-organismos que trabajan conjuntamente con la meteorización para formar el regolito que da origen a los suelos, incluyen: lombrices, nemátodes, hongos, bacterias y actinomicetos. Los macroorganismos incluyen los líquenes, las plantas superiores y los árboles.

La topografía de la tierra, plana a ondulante, moderada a empinada, con cambios de declive, influyen en preservar o perder el solum; es decir, la capa de suelo superficial con el subsuelo, según se va formando. Esto tiene su impacto en el factor tiempo que influye en la formación y espesor de las dos capas del solum, respectivamente. El tiempo en conjunto con el proceso de meteorización determina la edad del suelo, si es joven o viejo. La edad del suelo no es fácil de determinar; varía de pocos a miles de años. El carbón radiactivo C-14, ha sido usado para determinar la edad de las rocas y de la Tierra, el planeta. Se estima la vida de la Tierra en algo más de 4,500 millones de años y la del hombre, animales y plantas, en un millón de años.

#### Perfil del suelo

El perfil de un suelo normal no afectado por la erosión es un corte vertical de suelo en campo abierto, natural o cavado, que usa el pedólogo para observar y clasificar los suelos (fig. 6). El corte representa un volumen pequeño de suelo. El corte cavado debe medir 2 metros de largo por 1 m de ancho por 2 m de fondo para poder observar bien, metido dentro del hoyo, las variaciones horizontales y verticales del solum y el regolito. Una profundidad de 2 m es suficiente para la labor del pedólogo; a veces, puede ser menos o más si hay rasgos geológicos de importancia. El pedólogo usa corrientemente barrenas especiales manuables o una barrena mecánica montada sobre un camión que toma una muestra natural del perfil de suelo sin necesidad de cavar lo que contribuye a acelerar la labor necesaria para determinar el área y límites de los suelos clasificados.

El pedólogo limpia el perfil de suelo cavado para observar los cambios morfológicos, hacer las pruebas de campo y tomar muestras representativas donde crea conveniente para análisis físico, químico y mineralógico en el laboratorio. La presencia de subsuelo y de horizontes y subhorizontes, casi paralelos a la superficie, que demuestran variaciones y el grueso de éstos, revelan el grado de meteorización del suelo; esto ayuda a su clasificación. Hay suelos de formación reciente, como algunos aluviales, que no tienen subsuelo y horizontes; otros demuestran horizontes incipientes; a otros le queda sólo parte del subsuelo o el regolito porque las capas superficiales se han perdido por erosión. Hay suelos que no tienen regolito porque han sido depositados por el viento, el hielo o el agua, a presión, o son residuos orgánicos de descomposición vegetal.

## PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO

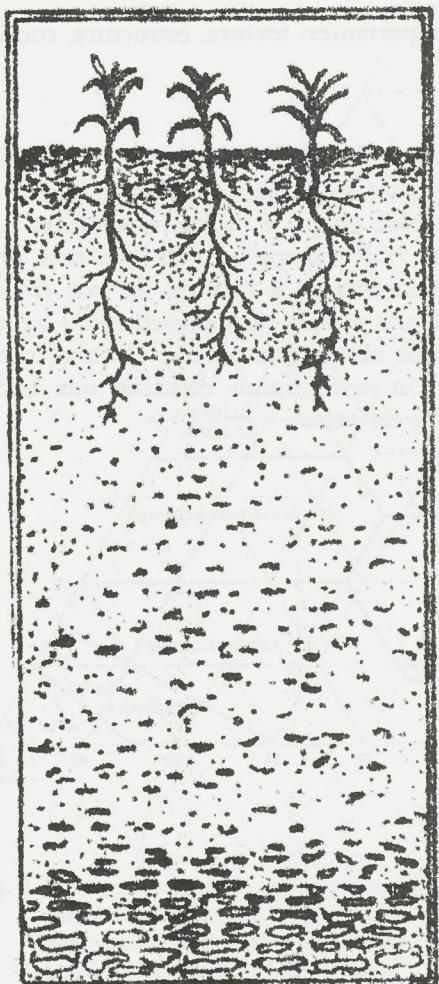


Fig. 6- Perfil de un suelo normal.

El pedólogo toma nota de la profundidad del nivel freático, si lo hay, en el fondo del perfil y determina si el suelo tiene buen o mal drenaje interno. Se familiariza también con el historial del campo donde radica el perfil y su uso. Mide el declive con instrumento. Hace pruebas simples colorimétricas de acidez o alcalinidad (pH), determina si el suelo es calcáreo y su consistencia; es decir, si el suelo es plástico, pegajoso, arcilloso, arenoso, al tacto. Todas estas pruebas inclusive el color identificado con una carta de colores, las hace en las capas u horizontes diferentes incluyendo el regolito. De igual modo observa con cuidado su estructura, la forma o arreglo de las partículas minerales y cómo se acomodan las unas con las otras.

## PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO

Los suelos poseen cuatro propiedades físicas importantes: textura, estructura, consistencia y densidad.

### Textura

La textura implica las proporciones relativas de las diferentes partes o fracciones en que se dividen según su tamaño. El pedólogo prueba la textura, al tacto, humedeciendo con agua una muestra de suelo. Si forma una cinta al apretar entre los dedos pulgar e índice, el suelo es de textura arcillosa. Si cruce al acercarlo al oído, es de textura arenosa. La textura se mide con más precisión por medio del análisis mecánico. Hay 12 clases de textura determinadas a base de los por cientos de arena, limo y arcilla de los suelos analizados (fig. 7). Las partículas varían en diámetro como sigue: arena .05-2 mm; limo .002-.05 mm y arcilla, menos de .002 mm. Los suelos fracos con textura franca, con excepción de los arenosos fracos son los más productivos. Un suelo franco contiene una buena proporción de partículas: 7-27% de arcilla, 28-50% de limo y 52% de arena.

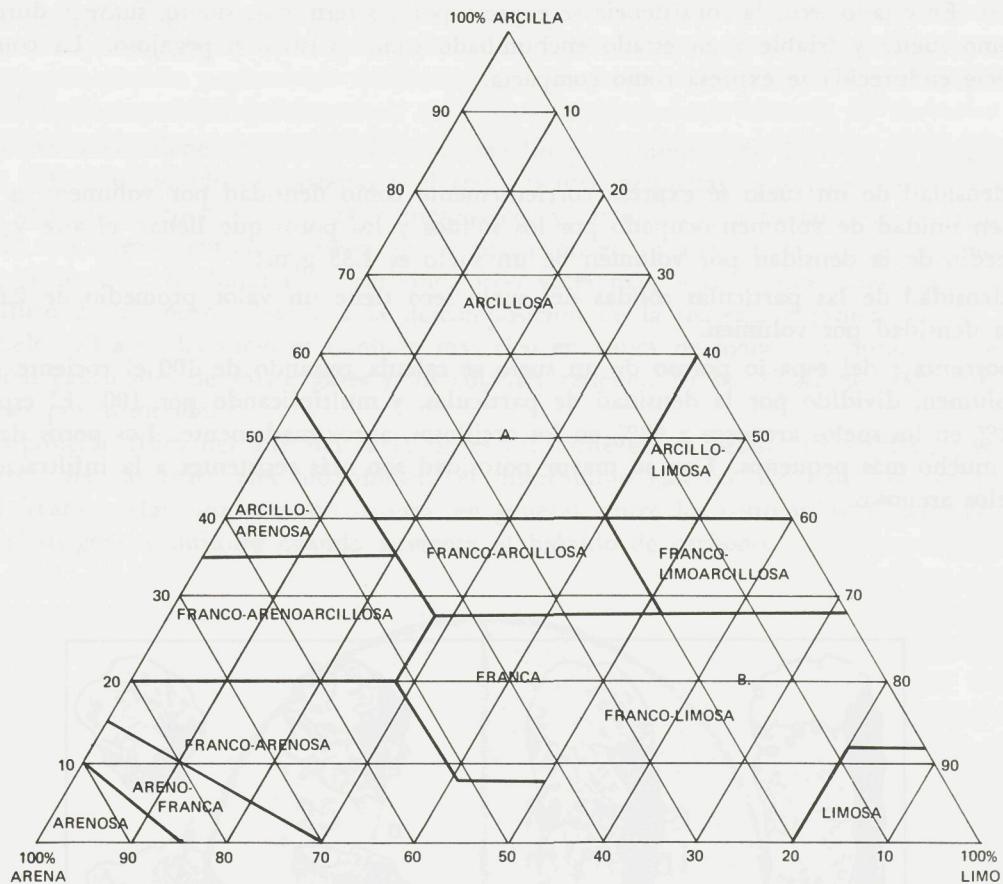


Fig. 7- Triángulo que indica los tantos por ciento de arcilla, .002mm.; limo, .002-.05mm. y arena, .05-2.0mm.; en las doce clases de textura. Punto A- La textura arcillosa contiene 50% arcilla, 25% limo y 25% arena. Punto B- La textura franco-limosa contiene 20% arcilla, 65% limo y 15% arena.

## Estructura

Los ped o partículas de los suelos se agrupan entre sí y aumentan su tamaño formando agregados. La estructura indica la orientación, la forma y acomodo de estos agregados en los horizontes del perfil formando las unidades ped. La estructura de los suelos se clasifica en seis clases (fig. 8).

## Consistencia

La consistencia del suelo se expresa en tres formas; a saber, a base del suelo seco, húmedo o enhumbado. En estado seco; la consistencia se expresa por los términos; suelto, suave y duro; en estado húmedo como suelto y friable y en estado enhumbado como plástico o pegajoso. La consistencia de una superficie endurecida se expresa como compacta.

## Densidad

La densidad de un suelo se expresa corrientemente como densidad por volumen; es el peso del suelo seco en unidad de volumen ocupado por los sólidos y los poros que llenan el aire y el agua. El valor promedio de la densidad por volumen de un suelo es 1.33 g/ml.

La densidad de las partículas sólidas del suelo seco tiene un valor promedio de 2.65 g/ml; el doble de la densidad por volumen.

El porcentaje del espacio poroso de un suelo se calcula restando de 100 el cociente de la densidad por volumen, dividido por la densidad de partículas, y multiplicando por 100. El espacio poroso varía de 32% en los suelos arenosos a 62% en los arcillosos, aproximadamente. Los poros de la fracción arcilla son mucho más pequeños. Con su mayor porosidad son más resistentes a la infiltración del agua que los suelos arenosos.

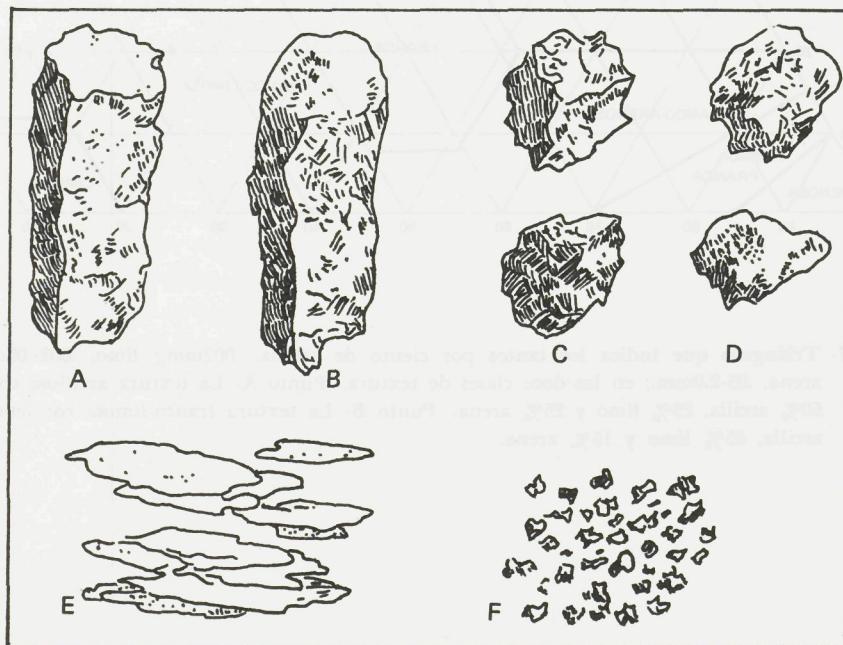


Fig. 8- Clases de estructura en los suelos: A, Prismática; B, Columnar; C, Bloque o Cuboide Angular; D, Bloque o Cuboide Subangular; E, Laminar; F, Granular.

## COMPONENTES DEL SUELO

Los cuatro mayores componentes de los suelos son: aire, agua, minerales y materia orgánica. La composición por volumen aproximada de la capa superficial de un buen suelo cultivable se expresa en la figura 9. El espacio poroso ocupado por el aire y el agua se distribuye aproximadamente en partes iguales, en la mitad del volumen. Esa composición varía con la clase de suelo y es bastante diferente en el subsuelo. Físicamente el suelo es una mezcla porosa de partículas de minerales libres o cementadas que se encuentran en agregados de diferentes tamaños conjuntamente con el aire, el agua y la materia orgánica que contribuye a cementar los pedazos.

### El aire del suelo

El aire del suelo tiene una composición promedio por volumen de 20.97% de oxígeno, 78.09% de nitrógeno, .03% de bióxido de carbono y el resto incluye pequeñas cantidades de los gases inertes: helio, argón, kriptón y xenón y otros gases inorgánicos y orgánicos que varían con el tiempo y sitio.

El suelo con buena ventilación tiene una composición en su aire similar al de la atmósfera; pero generalmente tiene .25% de bióxido de carbono, ocho veces más, y concentraciones algo más altas de metano y sulfuro de hidrógeno debido a la descomposición de la materia orgánica por los microorganismos del suelo. El aire del suelo es también más rico en vapor de agua. La humedad del suelo disuelve pequeñas cantidades de varios gases y los coloides retienen en su superficie pequeñas cantidades de ciertos gases por adsorción.

La composición física del aire del suelo no es constante en su perfil. Es afectada por el espacio poroso aprovechable, las reacciones bioquímicas, el intercambio gaseoso, las inundaciones y fluctuaciones del nivel freático. Hay una relación inversa, en general, entre los contenidos de oxígeno y bióxido de carbono; el oxígeno disminuye cuando aumenta el bióxido de carbono.

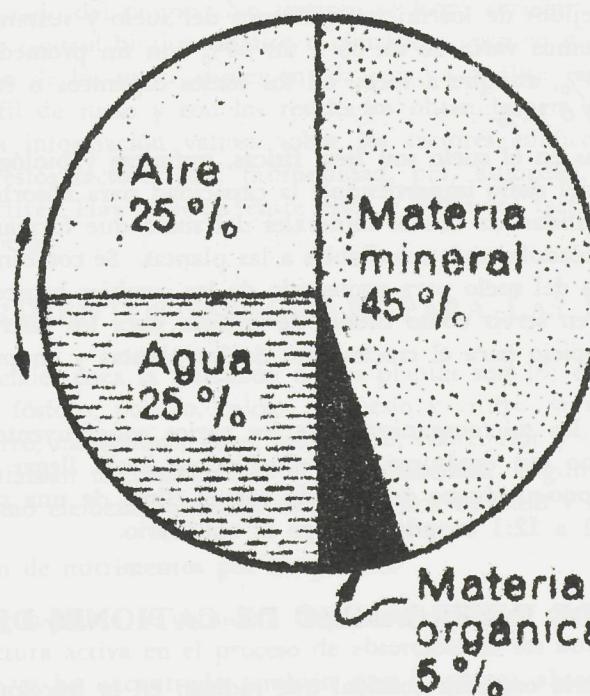


Fig. 9- Composición física aproximada por volumen de la capa superficial arable de un suelo normal.

### El agua del suelo

El agua del suelo se clasifica físicamente en tres formas: 1- higroscópica, que es retenida por los coloides de la fracción arcilla; 2- capilar, que es disponible por las plantas, y 3- superflua, que se pierde por gravedad. Las plantas sufren por exceso de agua en las inundaciones y con las subidas del nivel freático cuando se satura el área de la zona radical. Sufren también por falta de agua cuando el agua capilar disponible se pierde por evaporación y transpiración de la planta. Al agotarse el agua capilar, las plantas se marchitan y finalmente mueren; porque el sistema radical no puede absorber el agua higroscópica.

Las sales que contienen los nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas se disuelven en el agua del suelo. Un intercambio ocurre entre los sólidos del suelo y su solución acuosa y entre ésta y las raíces de las plantas. La solución del suelo es de naturaleza dinámica. La reducción de la humedad del suelo por la evaporación tiende a aumentar la concentración salina del suelo y causar problemas de salinidad en suelos mal manejados.

### Suelos minerales y orgánicos

Los suelos se dividen en tres grupos amplios: Minerales, Minerales-Orgánicos y Orgánicos. Los Suelos Minerales son los más abundantes: tienen cantidades de materia orgánica bien descompuesta que se llama, humus, en cantidades entre 1 al 5 ó 6%, principalmente en su capa superficial. La cantidad de humus desciende marcadamente en el sub suelo. Los suelos Minerales-Orgánicos contienen entre 20 y 50% de materia orgánica y los Suelos Orgánicos más de 50%. Los suelos que contienen hasta el 80% de materia y el 20% de minerales, aproximadamente, pueden cultivarse igual que los suelos minerales.

### Materia orgánica

La fracción orgánica del suelo, el humus, consiste de residuos vegetales y animales en varias etapas de descomposición, células y tejidos de los microorganismos del suelo y sustancias sintetizadas por estos. El contenido de carbón del humus varía de un 55 a un 60% con un promedio de 58%. Su contenido de nitrógeno (N) es de 3 a 6%, aunque a veces, en los suelos orgánicos o turbosos baja a .8 y 1% y en algunos subsuelos sube a 10 ó 12%.

Las funciones del humus en el suelo son tres: físicas, químicas y biológicas. Su acción física modifica el color y la estructura del suelo impariéndole la capacidad para absorber agua y aire. Su acción química influye sobre la solubilidad de ciertos minerales del suelo que forman compuestos con algunos elementos, como el hierro, haciéndolos más asimilables a las plantas. Se combina con el calcio y aumenta las propiedades amortiguadoras del suelo para protegerlo de los cambios bruscos de acidez y alcalinidad. La función biológica consiste en servir como fuente de energía para los microorganismos; en convertir el suelo en un medio más propicio para el crecimiento de las plantas y en proveer ciertos elementos y compuestos para su nutrición.

La descomposición por los microorganismos de los varios constituyentes de la materia orgánica de los suelos normales, que no son orgánicos, va reduciéndose hasta llegar a su etapa final, lo que establece una relación de carbono-nitrógeno de acuerdo con el clima de una región, que varía de 5:1 a 20:1 con un promedio de 10:1 a 12:1 cuando se llega al equilibrio.

## CAPACIDAD DE INTERCAMBIO DE CATIONES DEL SUELO

Los minerales y la materia orgánica coloidal que radican en la fracción arcilla del suelo, miden menos de .002 mm de diámetro; son visibles solamente en el microscopio electrónico; tienen una superficie extensa en relación con su peso que les imparte la propiedad de ser muy activas en reacciones químico-coloidales. Tienen el poder de intercambiar cationes con los cationes en la solución del suelo.

El intercambio de cationes en los suelos es una reacción de mucha importancia, igual que la de fotosíntesis, en la relación ambiental suelo-planta-clima para el crecimiento y la producción de cosechas.

#### Saturación de bases de los suelos

La saturación de bases, principalmente con los cationes calcio y magnesio, tiene también mucha importancia en la relación ambiental: suelo-planta-clima.

Los suelos de las regiones áridas y semiáridas están dominados por calcio y magnesio a veces con sodio que causa problemas de salinidad que perjudican las cosechas y afectan adversamente las propiedades físicas del suelo y lo hace más impermeable. Las plantas tienen que ejercer mayor esfuerzo para absorber agua. La lluvia lixivia los cationes solubles en las regiones húmedas, se va perdiendo calcio y magnesio, y a veces potasio, según la cantidad de lluvia y el tipo del suelo; hay más hidrógeno intercambiable en el mineral coloidal del suelo y aumenta su acidez. Un suelo con 60% de saturación de bases tiene 40% de hidrógeno intercambiable. Los suelos que contienen entre 50 y 60% de saturación de bases son buenos para la producción de cosechas si las otras condiciones ambientales son buenas. La acidez de los suelos se controla con aplicaciones adecuadas de carbonato calizo.

### FACTORES QUE LIMITAN EL CRECIMIENTO Y LA CALIDAD DE LAS COSECHAS

Los factores que limitan el crecimiento normal y la calidad de las cosechas que están relacionados con el ambiente son tres: bióticos, edáficos y climáticos.

Los factores bióticos están relacionados con la viabilidad y la calidad de la semilla, el vigor del esqueje o patrón para el injerto o con la condición de la planta que vaya a sembrarse. El factor más importante es el hombre porque escoge la semilla, el esqueje y la planta, controla el tratamiento del suelo y hasta cierto grado, el riego y el drenaje.

El factor edáfico se refiere al suelo. Los tipos y series de suelos tienen distintas capacidades para producir cosechas. La diferencia es más evidente en las áreas bajo cultivo donde se han seguido prácticas rutinarias para el manejo del campo. No siempre se logra corregir por completo la diferencia en producción modificando el control biótico, edáfico o climático; pero en muchos casos se obtienen buenos resultados. La clasificación de los suelos suplementada con los análisis físicos, químicos y mineralógicos de los horizontes del perfil de suelo y con los resultados obtenidos en las investigaciones de campo o en el invernadero, aporta información valiosa sobre los factores edáficos que limitan la producción. Los más importantes de estos factores son: profundidad, pH, humedad, composición mineralógica de la arcilla, fertilidad y declive. Hay relación entre ellos y entre los factores bióticos y climáticos, pues unos influyen sobre los otros.

### NUTRIMENTOS ESENCIALES PARA LAS PLANTAS

Los elementos esenciales para la nutrición de las plantas son 16; de los cuales 9: carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y azufre, se requieren en cantidades relativamente mayores y 7: hierro, manganeso, boro, molibdeno, cobre, zinc y cloruro, en cantidades menores. Por eso estos últimos se llaman microelementos u oligoelementos. Algunos fisiólogos no le dan mucha importancia al cloruro como elemento esencial. Otros añaden el sodio y el cobalto.

#### Teorías sobre la absorción de nutrientes por las plantas

La relación suelo-agua-planta se considera importante, pues se creía que el sistema radical de la planta era su única estructura activa en el proceso de absorción de los nutrientes asimilables del suelo. Durante los últimos años se ha encontrado también que la planta absorbe algunas sustancias solubles por las hojas, tales como el nitrógeno en forma amino de la urea, el potasio, el hierro y otros. Por tanto la relación planta-aire es también importante. Aún se desconocen muchos detalles relacionados con la absorción de los nutrientes por las plantas. Las teorías en la relación suelo-agua-planta son tres:

nutrición de la solución del suelo, nutrición por contacto con los coloides del suelo y nutrición por conductores específicos que se encuentran en las superficies externas de las células o membranas de las raíces y se combinan con los iones absorbidos del suelo.

## LOS FERTILIZANTES

La fertilidad de un suelo está en relación con la cantidad y disponibilidad de los nutrientes esenciales que éstos puedan proporcionar para el crecimiento normal, producción y calidad de la cosecha. Un suelo de fertilidad baja produce rendimientos pobres. El exceso de uno o más nutrientes puede causar toxicidad y muerte de la planta. Los fertilizantes principales proporcionan nitrógeno, fósforo y potasio. También proporcionan calcio, magnesio y azufre si se desea, o suplementados con microelementos tales como zinc, boro, cobre, manganeso, molibdeno y cobalto, en formas de materias primas o mezclados en fórmulas comerciales.

## PROCESOS BIOLÓGICOS DEL SUELO

Los procesos biológicos del suelo tienen mucha importancia en relación con los efectos químicos en la contaminación ambiental. Tres ciclos naturales son activos: el de carbono, el de nitrógeno y el de azufre.

### Ciclo del carbono (fig. 10)

La descomposición de los residuos orgánicos por los microorganismos del suelo es el proceso que libera mayormente el carbono en forma del gas bióxido de carbono. Los procesos químicos de las reacciones del carbonato calizo con los ácidos del suelo y la exudación en el proceso de respiración de las plantas y sus raíces contribuyen también a la liberación del bióxido de carbono de los suelos; pero en cantidad menor. Los procesos de descomposición de los hidratos de carbono, las hemicelulosas, la celulosa y las proteínas que componen los residuos vegetales del suelo toman parte activa en el ciclo de carbono.

Los residuos vegetales se componen de numerosos compuestos orgánicos entre los cuales los más importantes son: grasas, aceites, ceras, solubles en éter y alcohol; los hidratos de carbono simples como glucosa, fructosa, sacarosa y glicógeno; los polisacáridos: celulosa, hemicelulosas; la lignina; las proteínas y la ceniza con su contenido de minerales. También se encuentran otros constituyentes como los ácidos orgánicos, pectinas, gomas y mucílagos, aldehidos, acetonas y alcoholes; compuestos cíclicos como los hidrocarburos, fenoles, quinonas, taninos, etc., enzimas, hormonas, vitaminas y otros.

Los constituyentes químicos, alrededor del 90% de la paja de dos variedades de caña, estudiadas por Bonnet (4) se informan en el cuadro 8. La descomposición de los grupos orgánicos de dicha paja se ilustra en la figura 11.

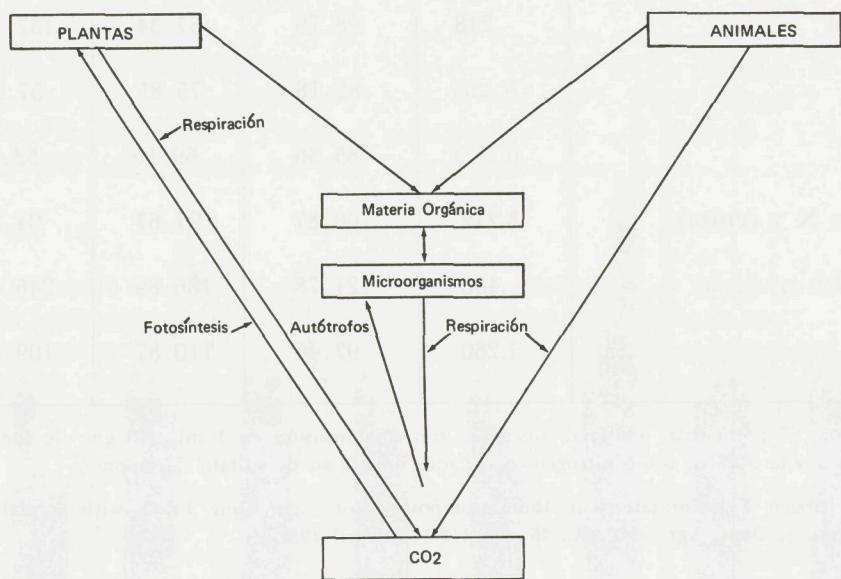


FIG. 10.—Ciclo del carbono.

Cuadro 8- Por cientos residuales de los constituyentes orgánicos originales de la paja de caña de azúcar después de la descomposición por los microorganismos, en la ausencia y presencia de nitrógeno añadido, después de 30 y 60 días<sup>2/</sup>.

Constituyente <sup>1/</sup>	Material original	Por ciento residual			
		Sin nitrógeno		Con nitrógeno	
		gm.	30 días	60 días	30 días
Total material seco	20.000		89.50	82.00	74.50
Soluble en éter	.370		52.16	54.05	63.24
Soluble en agua fría y caliente	.696		87.36	89.51	160.21
Soluble en alcohol	.248		98.79	67.34	137.50
Hemicelulosas	5.264		82.18	75.85	57.52
Celulosas	6.570		85.36	69.10	53.27
Ligninas (libre de N y ceniza)	3.212		100.87	97.67	94.21
Proteínas insolubles en agua	.450		121.78	186.89	246.44
Ceniza total	1.260		97.46	110.87	109.84
					115.63

1/ Contenido de agua, 66 por ciento; material inoculado con una infusión de 1 ml. (10 gm. de suelo y 100 ml. de agua de la pluma), incubado a 28°C; como nitrógeno se añadió un gramo de sulfato de amonio.

2/ Bonnet, J. A., Nitrogen Transformations in the Decomposition of Sugar Cane Trash, with Special Bearing upon Puerto Rico Soil Problems, J. Dept. Agr. of P. R., 15 (2) 113-146, April 1931.

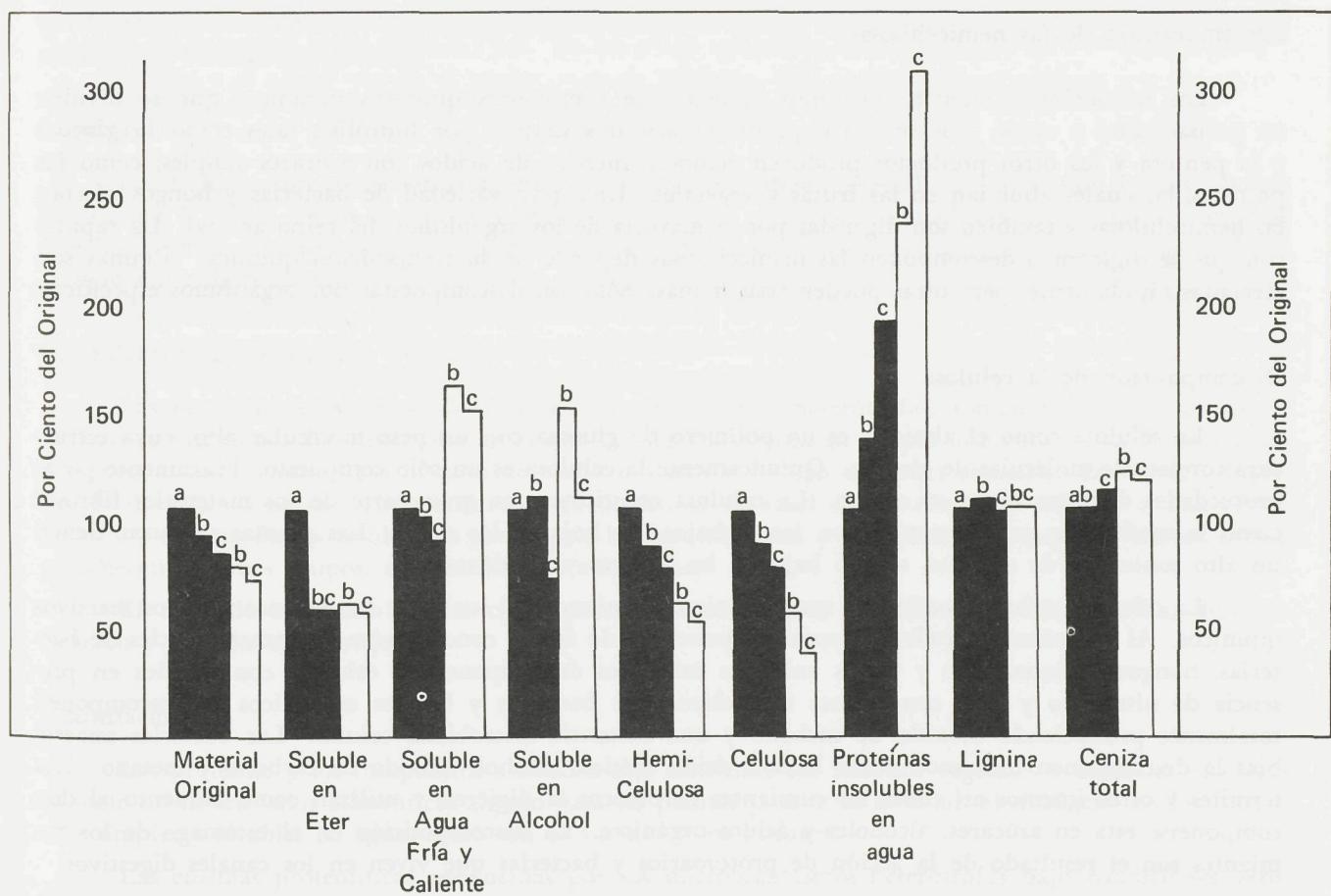


Fig. 11- Descomposición de los grupos orgánicos de la paja de caña de azúcar a- Material al empezar la descomposición; b- Después de 30 días; c- Residuo después de 60 días. Área negra sin nitrógeno; área blanca con nitrógeno.  
Tomado de Bonnet (4).

## Descomposición de los hidratos de carbono

Los microorganismos del suelo descomponen rápidamente los hidratos de carbono en los diferentes productos orgánicos, dependiendo de la naturaleza del compuesto, de los organismos y de las condiciones ambientales existentes, especialmente en la presencia de oxígeno. Los hongos que atacan la glucosa producen los ácidos cítrico y oxálico además del agua y el gas bióxido de carbono. Las bacterias anaerobias y las levaduras producen ácido láctico, alcohol, ácido butírico, bióxido de carbono e hidrógeno. Los hongos, bajo condiciones anaerobias producen ácido fumárico, alcohol y agua y bajo condiciones aerobias, ácido fumárico y agua. Las enzimas específicas hidrolizan el almidón para formar dextrinas, y finalmente los azúcares glucosa y maltosa. Un gran número de microorganismos; hongos, bacterias y actinomicetos, descomponen los almidones.

## Descomposición de las hemicelulosas

Las hemicelulosas tienen una gran variedad de compuestos químicos orgánicos que se dividen en polisacáridos y otros. Los primeros producen azúcares simples por hidrólisis tales como la glucosa y la pentosa y los otros productos producen ácidos o mezclas de ácidos con azúcares simples, como las pectinas, las cuales abundan en las frutas y vegetales. Una gran variedad de bacterias y hongos afectan las hemicelulosas y también son digeridas por la mayoría de los organismos del reino animal. La rapidez con que se digieren o descomponen las hemicelulosas depende de su composición química. Algunas son afectadas rápidamente, pero otras pueden resistir más. Sólo son descompuestas por organismos específicos.

## Descomposición de la celulosa

La celulosa como el almidón es un polímero de glucosa con un peso molecular alto, cuya estructura consiste de moléculas de glucosa. Químicamente la celulosa es un sólo compuesto. Físicamente posee propiedades distintas según su origen. La celulosa constituye una gran parte de los materiales fibrosos como la madera, la paja, los rastrojos, los yerbajos, las hojas y los tallos. Las plantas maduras tienen un alto contenido de celulosa, siendo bajo en las jóvenes y suculentas.

La celulosa resiste la acción de muchos microorganismos del suelo, de las enzimas y de los reactivos químicos. Al hidrolizarse produce glucosa en presencia de ácidos concentrados. Algunas especies de bacterias, hongos, actinomicetos y varios animales inferiores descomponen la celulosa con rapidez en presencia de nitrógeno y bajo condiciones favorables. Las bacterias y hongos específicos la descomponen totalmente produciendo bióxido de carbono y una sustancia microbiana celular. Las bacterias anaerobias la descomponen formando ácido láctico, ácido acético, alcohol, bióxido de carbono y metano. Los termitos y otros insectos así como los rumiantes herbívoros la digieren y utilizan como alimento al descomponerse esta en azúcares, alcoholes y ácidos orgánicos. La descomposición en el estómago de los rumiantes son el resultado de la acción de protozoarios y bacterias que viven en los canales digestivos.

## Descomposición de las proteínas

Los residuos vegetales y los fertilizantes orgánicos nitrogenados de origen vegetal y animal contienen proteínas que son compuestos complejos de aminoácidos; estos consisten principalmente de carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno; algunos tienen azufre y iodo. Los por cientos de carbono varían de 25 a 65.4; de hidrógeno, de 1.4 a 10; de oxígeno, de 8.2 a 48.1 y de nitrógeno, de 1.8 a 32.2, aproximadamente. El aminoácido, cistina, contiene 26.68% de azufre y la metionina, 21.49%; otros dos contienen 58.62% y 65.35% de iodo, respectivamente.

Las proteínas tienen pesos moleculares altos que varían cerca de 30,000 hasta varios millones; se diferencian en su naturaleza y sus funciones según su composición de aminoácidos. Se descomponen

en varios polipéptidos y aminoácidos simples por la hidrólisis causada por las enzimas o los reactivos químicos. Los aminoácidos simples son afectados por una gran variedad de bacterias y hongos, descomponiéndose en amoníaco, bióxido de carbono y varios ácidos orgánicos y alcoholes. Cuando se hallan en condiciones anaerobias estos microorganismos producen varias aminas y compuestos orgánicos sulfurados con malos olores. La cantidad de nitrógeno que se cambia a amoníaco depende de la naturaleza del organismo y de la proteína y de la presencia de hidratos de carbono y de las condiciones ambientales del suelo. La descomposición de las proteínas y de los aminoácidos libera energía y los organismos sintetizan una cantidad de materia celular. De esta manera el nitrógeno se consume y se transfiere a la célula del organismo. Véase el aumento de la proteína en la descomposición de la paja de caña (fig. 11). La proporción total de nitrógeno que se transforma en amoníaco puede variar de un 50 a 80%. Los residuos vegetales y animales además de las proteínas contienen otros compuestos nitrogenados que incluyen la urea y otros como la cianamida que ciertos microorganismos convierten en urea y que luego queda en dicianodiamina. Este compuesto es tóxico a ciertas bacterias. La urea se descompone en amoníaco y bióxido de carbono.

### Ligninas

Las ligninas son compuestos orgánicos complejos de origen vegetal. Su contenido en las plantas varía entre 5 y 30% según la especie y grado de madurez. Las plantas maduras tienen mayor cantidad que las jóvenes. Durante la descomposición de los grupos orgánicos, las ligninas tienden a acumularse porque son más resistentes.

### Ciclo del nitrógeno (fig. 12)

Las bacterias del suelo se dividen en dos: autótrofas y heterótrofas; toman parte muy activa en el ciclo de nitrógeno. Las autótrofas igual que las algas producen su propio alimento; es decir, se nutren a sí mismas asimilando el gas bióxido de carbono y oxidando una sustancia específica de donde adquieren la energía necesaria. Las heterótrofas no poseen la facultad de nutrirse a sí misma; toman nutrientes y energía de los residuos orgánicos, de las hemicelulosas y celulosas. Hay algunas bacterias que pertenecen a ambos grupos; son facultativas autótrofas.

El ciclo de nitrógeno abarca cinco procesos: aminización, amonificación, nitrificación, desnitrificación y fijación de nitrógeno.

### Aminización

Las proteínas y los compuestos asociados que contienen los residuos vegetales y animales añadidos al suelo no tienen valor alimenticio alguno para las plantas pues éstas asimilan el nitrógeno en las formas más simples y solubles en agua, como son el amonio y los nitratos.

Las enzimas proteolíticas producidas por los microorganismos heterótrofos bajo condiciones aerobias convierten las proteínas y sus asociados en compuestos que contienen el grupo amino, tales como proteosas, peptonas y finalmente aminoácidos. Este proceso se denomina aminización. En la reacción se libera energía y el gas bióxido de carbono.

La bacteria que vive en los nódulos y que hace parte de entre la fisiología y biología del suelo es la que convierte el nitrógeno del aire en amoníaco.

La bacteria que vive en los nódulos y que hace parte de entre la fisiología y biología del suelo es la que convierte el nitrógeno del aire en amoníaco. La cantidad de nitrógeno fijado por los legumbres sembradas con semillas inoculadas con el nódulo radicular promedia entre 60 y 200 kg/ha y acre según la especie.

La fijación del nitrógeno del aire por un microorganismo heterótrofo que lo puede hacer por el aire como lo hacen las azobacterias utilizando la energía de la materia orgánica del suelo se llama fija-

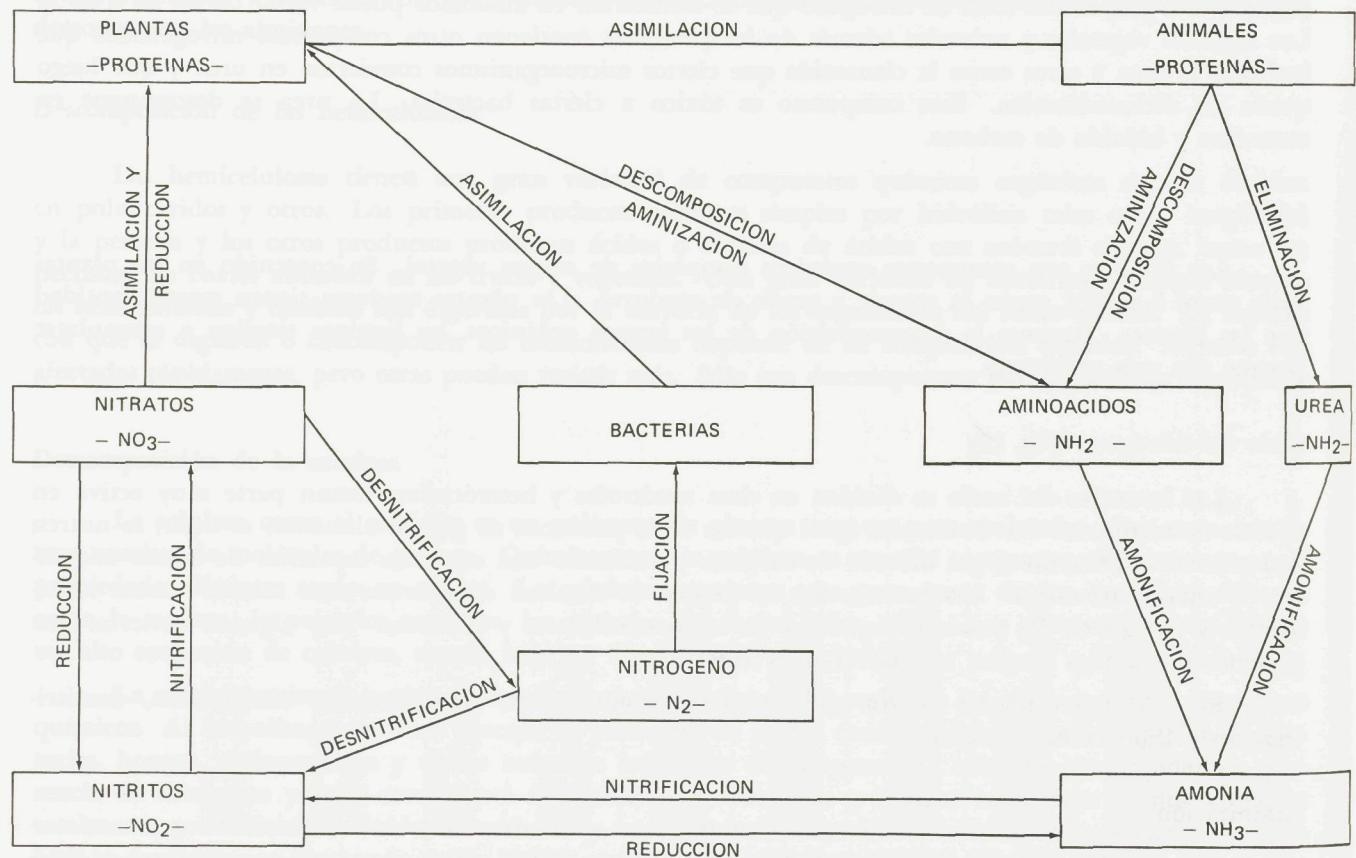


FIG. 12.—Ciclo del nitrógeno.

## Nitrificación

El proceso biológico por el cual algunas bacterias específicas del suelo oxidan el amonio convirtiéndolo en nitrato se denomina nitrificación. Ocurre en dos etapas bien coordinadas producidas por la oxidación enzimática de dos clases de nitrobacterias: las nitrosomonas que oxidan el amonio para convertirlo en nitrito, y las nitrobacterias que oxidan los nitritos para formar nitratos.

Las bacterias nitrificadoras son muy sensibles a los cambios en el medio ambiente del suelo, tales como la aeration, la temperatura, la humedad, la presencia del calcio y fertilizantes y la relación carbono-nitrógeno en el humus.

Cualquier forma que mejora la aeration o ventilación del suelo como son el arado, el cultivo o el drenaje, favorece la nitrificación. La temperatura más favorable es alrededor de 27.5°C; la humedad ideal es la óptima, entre la mitad y las dos terceras partes de la capacidad total del suelo para retener humedad y la acidez, entre pH 5.0 y 6.5. En las zonas templadas, la nitrificación es más rápida durante la primavera y el otoño que en el verano o en el invierno. Los nitratos son absorbidos por las plantas como nutriente o lo utilizan los microorganismos del suelo.

## Desnitrificación

El proceso por el cual las bacterias reducen el nitrato, el nitrito o el nitrógeno molecular a la forma de gas ( $N_2$ ) o, en algunos casos, al gas óxido nitroso ( $N_2O$ ) ocasionando la pérdida de nitrógeno, se llama desnitrificación. Las bacterias desnitrificadoras, todas aerobias, son los microorganismos activos en la desnitrificación. Sin embargo, el proceso se lleva a cabo bajo condiciones anaerobias, pues las bacterias utilizan el oxígeno del nitrato o del nitrito para respirar. La ausencia del nitrato o nitrito detiene la desnitrificación.

La volatilización o pérdida de nitrógeno en forma del gas amoníaco también puede ocurrir por reacción química en los suelos calcáreos. Suele ocurrir también debido a la descomposición química de los nitritos bajo condiciones ácidas para convertirlos en los gases de óxidos de nitrógeno o por reacción química no enzimática, entre el ácido nitroso con amonio y los aminoácidos para producir el gas nitrógeno.

## Fijación del nitrógeno simbiótico y no-simbiótico

El grupo de bacterias heterótrofas específicas que tienen la capacidad de fijar en sus cuerpos el nitrógeno del aire lleva a cabo la fijación del nitrógeno. Las algas azul-verde tienen también esta capacidad que ejercitan especialmente en los campos sembrados de arroz. Hay dos grupos de bacterias que fijan el nitrógeno del aire: las simbióticas y las no-simbióticas.

Las bacterias simbióticas aerobias viven en asociación con una planta leguminosa; se alimentan de ella tomando minerales y le ceden el nitrógeno que fijan del aire para producir proteínas. El proceso de beneficio mutuo entre la planta y la bacteria se llama simbiosis. Se les llama también nodulares porque producen nódulos en las raíces de las leguminosas y de los árboles forestales y también en las hojas de ciertas plantas donde se albergan. Un grupo de hongos-setas llamados mycorrizas son también simbióticos pues fijan el nitrógeno del aire en asociación con algunos árboles forestales de los cuales se nutren.

La bacteria que vive en los nódulos y que toma parte durante la función biológica de la fijación del nitrógeno del aire se llama bacilo radicícola. La cantidad de nitrógeno fijada del aire por las leguminosas sembradas con semillas inoculadas con el bacilo radicícola puede variar entre 50 a 250 libras por acre según la especie.

La fijación del nitrógeno del aire por un microorganismo heterótrofo que lo pueda hacer por sí solo como lo hacen las azobacterias utilizando la energía de la materia orgánica del suelo se llama fija-

ción no-simbiótica. Las condiciones favorables para el crecimiento de las azobacterias son: una relación de carbono-nitrógeno amplia; una acidez del suelo entre pH 6.0 y 6.5; suficiente calcio y fósforo; la presencia de oxígeno; y una temperatura entre 30 y 35°C. La cantidad de nitrógeno fijada del aire varía de 10 a 50 libras por acre.

#### Relación carbono-nitrógeno

La razón carbono-nitrógeno del material vegetal es variable; fluctúa de 20:1 a 30:1 en las leguminosas; en el estiércol llega a 90:1; en los residuos secos de los cereales y árboles puede llegar hasta 90:1; la de la paja de la caña de azúcar es alrededor de 68:1. Los cuerpos de los microorganismos del suelo tienen una relación de carbono-nitrógeno más reducida: varía entre 4:1 y 9:1.

La descomposición por los microorganismos del suelo de los varios constituyentes de la materia orgánica de los suelos normales, que no son orgánicos, va reduciéndose hasta llegar a su etapa final, lo que establece una relación carbono-nitrógeno de acuerdo con el clima de la región. La razón carbono-nitrógeno de los suelos cultivados, manejados más o menos de igual manera, varía de 5:1 a 20:1 con un promedio de 10:1 a 12:1 en los suelos más fértiles.

#### Ciclo del azufre (fig. 13)

El azufre es un componente esencial de las proteínas que se encuentra en tres aminoácidos: cistina, cisteína, y metionina. Es un elemento esencial para la vida de las plantas. El ciclo del azufre en la naturaleza tiene mucha importancia. La mayor parte del azufre del suelo, entre la mitad y las tres cuartas partes, se encuentra en forma orgánica. La relación carbono: azufre, C:S de la fracción orgánica del suelo es aproximadamente de 100:1 y la de nitrógeno total a azufre orgánico es aproximadamente de 10:1. El contenido de azufre de muchos microorganismos fluctúa entre .1 y 1% del peso seco.

Un grupo de microorganismos sulfo-oxidantes participan en la oxidación o reducción de los compuestos de azufre en el suelo. La reacción de azufre, sulfuro y tiosulfato puede ocurrir en el suelo por reacciones químicas; pero la oxidación microbiológica es más rápida si las condiciones ambientales son favorables.

Bajo condiciones anaerobias, ciertas bacterias sulfureductoras específicas reducen los sulfatos, sulfuros y tiosulfatos, al gas sulfuro de hidrógeno. El proceso se llama sulfurección. La ausencia de oxígeno y la presencia de materia orgánica como fuente de energía son necesarios para este proceso. La bacteria usa el oxígeno del sulfato, del sulfuro o tiosulfato para oxidar la materia orgánica y usa, en parte, la energía liberada. Esta reacción ocurre frecuentemente en los manglares en donde se percibe el olor desagradable del sulfuro de hidrógeno. En la presencia del hierro se forma el sulfuro de hierro negro que es el mineral pirata. La reducción bacteriana del azufre produce corrosión del hierro en las tuberías de acero las cuales inutiliza. El gas sulfuro de hidrógeno puede también oxidarse y convertirse en sulfuros o sulfatos por acción de las bacterias.

Los procesos microbiológicos que afectan las transformaciones de nitrógeno y azufre en el suelo, también producen la oxidación o reducción del hierro y del manganeso. El suelo contiene de un 25 a 80% del fósforo en forma orgánica. En la descomposición de la materia orgánica por los microorganismos, parte del suelo se convierte en sustancia mineral procedente de fosfatos, el cual sirve de nutriente a las plantas y ayuda al metabolismo microbiano.

Todos estos problemas, al igual que el de la meteorización para formar el suelo, necesitan agua para llevarse a cabo. Las plantas, los animales y microorganismos la requieren para vivir y reproducirse. Tanto la escasez como el exceso de agua en el suelo limitan estos procesos y causan daños que reducen los rendimientos de las cosechas y la producción animal.

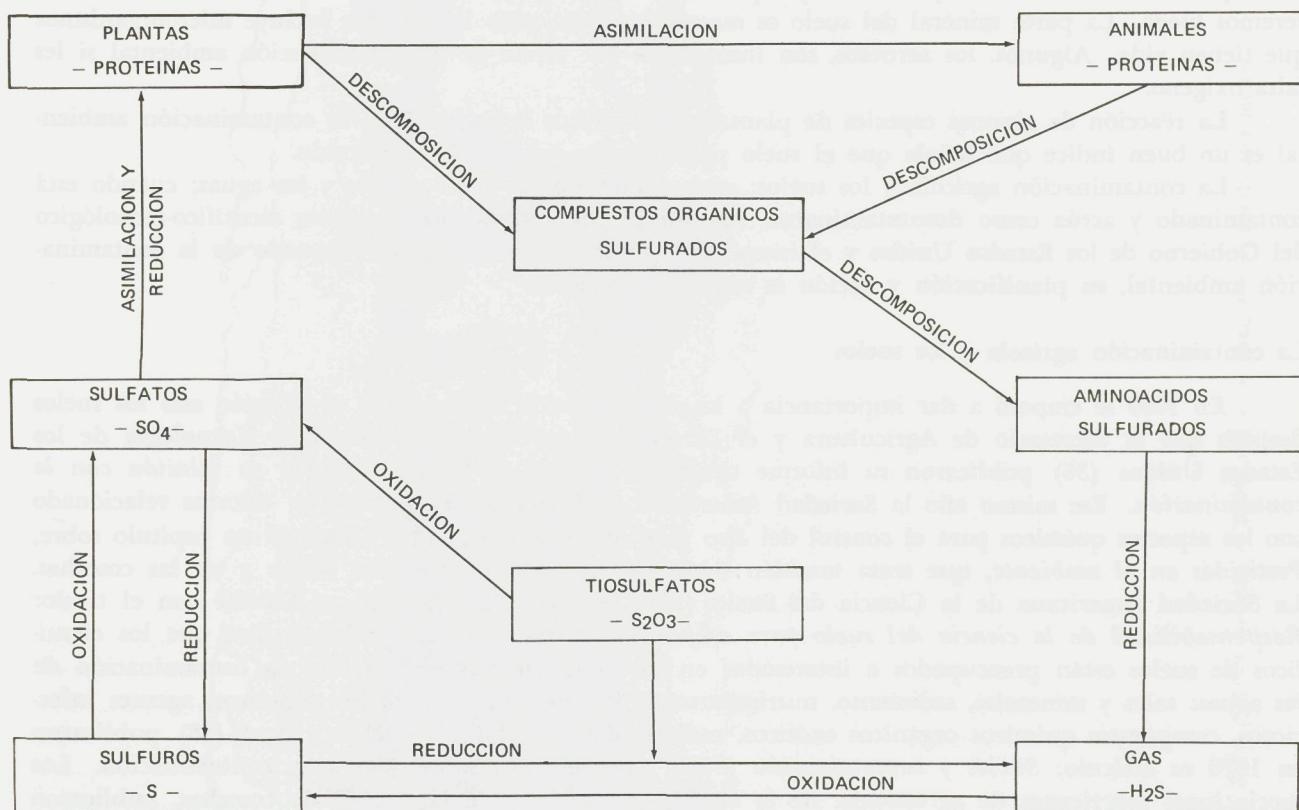


FIG. 13.—Ciclo del azufre.

## LOS SUELOS Y LA CONTAMINACIÓN

La contaminación ambiental es algo muy antiguo; viene causando malos efectos en los suelos y las plantas desde hace millones de años con más o menos intensidad. Muchas especies de plantas, animales, aves y peces han desaparecido o disminuido en número por efectos ecológicos que han contribuido a la erosión y a la infertilidad de extensas áreas terrestres.

Los suelos se componen físicamente de aire, agua y materia mineral y orgánica (fig. 9). Todo lo dicho en relación con la contaminación del aire y las aguas es aplicable a estos dos componentes del suelo; pero el suelo tiene más protección porque muchas veces puede actuar como descontaminante como veremos luego. La parte mineral del suelo es materia muerta; pero la orgánica incluye microorganismos que tienen vida. Algunos, los aerobios, son inactivados por efecto de la contaminación ambiental si les falta oxígeno.

La reacción de algunas especies de plantas a los efectos indeseables de la contaminación ambiental es un buen índice que señala que el suelo puede haber sido también afectado.

La contaminación agrícola y los suelos; cómo contamina el suelo el aire y las aguas; cuándo está contaminado y actúa como descontaminante, son tópicos de interés. El programa científico-tecnológico del Gobierno de los Estados Unidos y el interés del público para el control adecuado de la contaminación ambiental, su planificación y acción es algo muy reciente.

### La contaminación agrícola y los suelos

En 1969 se empezó a dar importancia a la contaminación agrícola y a su relación con los suelos después que el Secretario de Agricultura y el Director de la Oficina de Ciencia y Tecnología de los Estados Unidos (36) publicaron su informe titulado: *Control de la agricultura y su relación con la contaminación*. Ese mismo año la Sociedad Americana de Química (1) publicó su informe relacionado con los aspectos químicos para el control del aire y las aguas contaminadas e incluyó un capítulo sobre, *Pesticidas en el ambiente*, que trata también sobre el efecto de estos en los suelos y en las cosechas. La Sociedad Americana de la Ciencia del Suelo (31) publicó el informe de un Comité con el título: *Responsabilidad de la ciencia del suelo para mejorar la calidad del agua*, donde dice que los científicos de suelos están preocupados e interesados en los ocho factores que afectan la contaminación de las aguas: sales y minerales, sedimento, nutrientes de las plantas, desperdicios orgánicos, agentes infecciosos, compuestos químicos orgánicos exóticos, radiactividad y calor. Wadleigh y Dyal (38) publicaron en 1970 su artículo: *Suelos y contaminación* y Foy (18) el suyo sobre *Plantas y contaminación*. Las asociaciones americanas de agronomía, de la ciencia del suelo y de la ciencia de cosechas, publicaron para enero-marzo, 1972, el primer número del *Journal of Environmental Quality*. La Conferencia de las Naciones Unidas sobre "El Ambiente Humano", celebrada en Estocolmo, Suecia, en junio 1972, dio importancia al suelo según lo informa la revista *Life* (21). Dice que en África y en América los métodos pobres usados para el manejo de los suelos y el sobrepastoreo han empobrecido millones de acres. La construcción de caminos en las junglas de la América del Sur también ha destruido muchas áreas de bosques tropicales y las compañías madereras en Asia han deforestado áreas extensas sin resembrarlas y el negocio minero a cielo abierto en los Estados Unidos destruye un estimado de 100,000 acres al año.

Los Informes Ambientales sobre Puerto Rico para 1971 y 1972 de la Junta de Calidad Ambiental (19), cubren aspectos geográficos, sociales, políticos y económicos. No entran a fondo en los problemas de contaminación relacionados con los suelos y la agricultura. El capítulo 9 del Primer Informe presenta datos sobre el área, el declive, el potencial agrícola y las planicies inundables de los terrenos disponibles. Se ilustra con un mapa de las regiones topográficas de la Isla, (fig. 14). Menciona problemas relacionados con las tierras en tres áreas de Puerto Rico: 1- La importancia de los posibles daños que puede ocasionar el proceso de distribución de los terrenos, nuestro recurso natural más escaso; 2- Dificultad en encontrar soluciones gubernamentales debido al alto precio de los terrenos; lo difícil de planificar y actuar y 3- La pequeña cantidad de fondos federales. El Capítulo 8 del Segundo Informe dice que el Negociado de Planes de la Junta de Planificación de Puerto Rico está preparando el plan de uso de

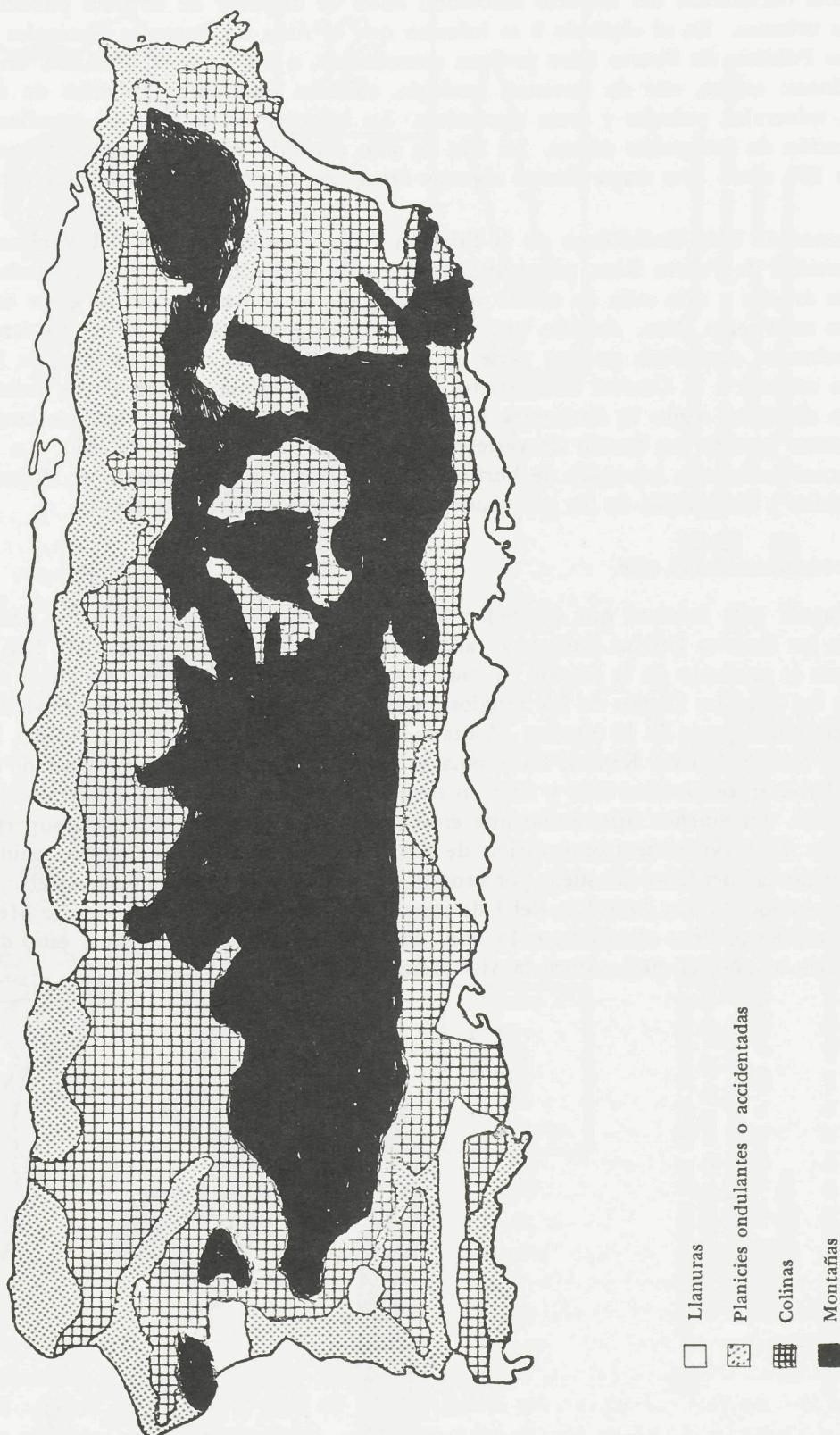


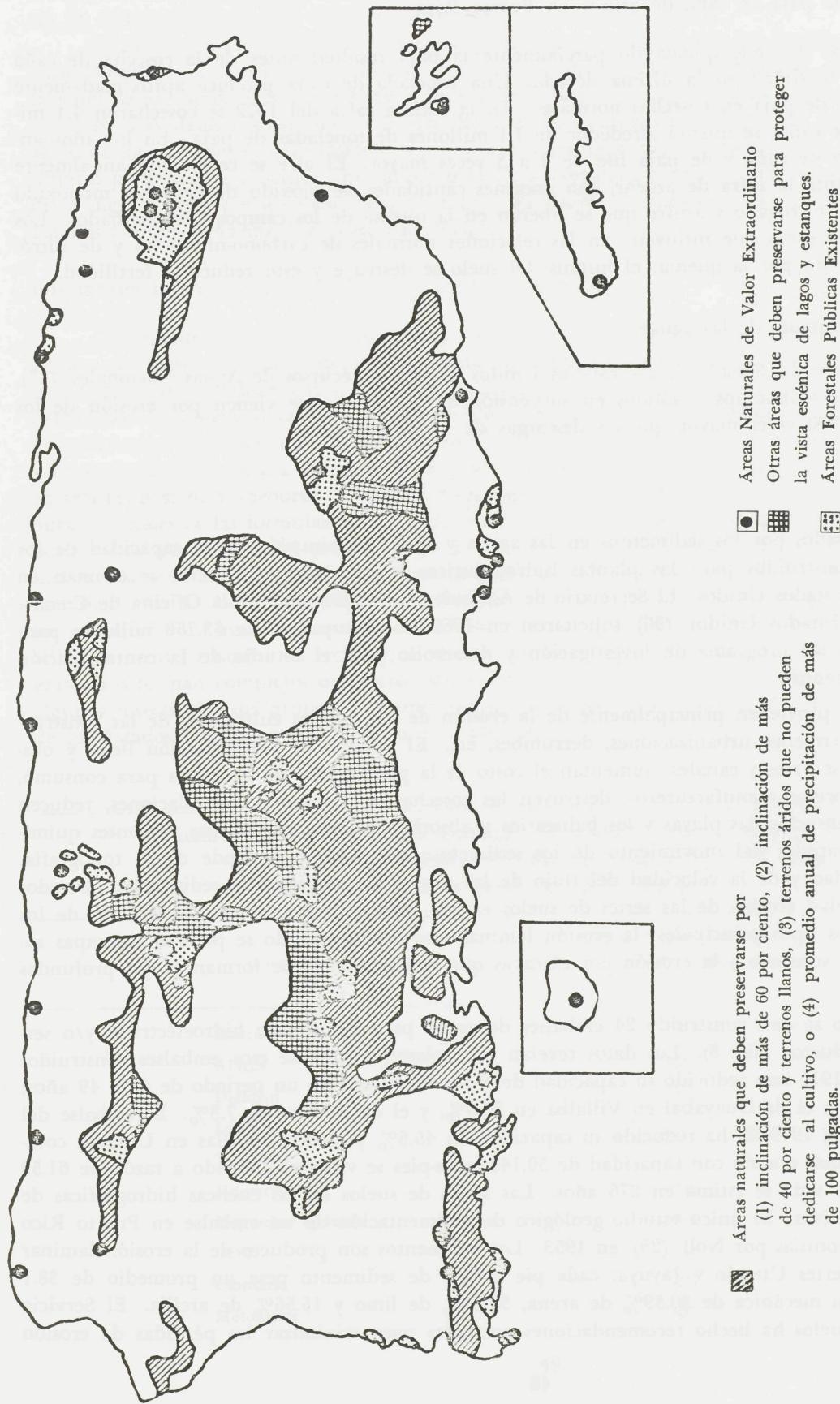
Fig. 14- Regiones Topográficas de Puerto Rico. (583,224 cuerdas, el 27.6% del área total; tienen pendientes menor del 15%).

terrenos para toda la Isla. Se recomienda que los guías de la Junta de Calidad Ambiental de Puerto Rico requieran una declaración del impacto ambiental antes de disponer de terrenos públicos fuera de las actuales zonas urbanas. En el capítulo 9 se informa que el Área de Recursos Naturales del Departamento de Obras Públicas de Puerto Rico prepara actualmente, a un costo de \$350,000, un inventario sobre ocho renglones: suelos, uso de terrenos, geología, recursos instalados (tuberías de acueductos), cuerpos de agua, minerales, paisajes y áreas recreativas. La información se basa en estudios ya hechos y en la interpretación de fotografías aéreas. La Isla ha sido dividida en cuadrángulos de un kilómetro cuadrado igual a 250 acres. Un mapa ilustra algunas áreas naturales cuya preservación se recomienda (fig. 15).

El Dr. Marcos A. Tió, fitofisiólogo de la Estación Experimental Agrícola del Recinto de Mayagüez de la Universidad de Puerto Rico, posee una colección de diapositivas en colores donde se destaca el daño a algunos árboles y a la caña de azúcar ocasionado por la contaminación de gases orgánicos de algunas industrias en Puerto Rico. Árboles que empezaron por marchitarse y luego murieron con sus cortezas secas quebradas cayéndose, pueden verse al acercarse al puente en la entrada de la carretera número 2 que da entrada a la Central Cambalache en Arecibo. Campos adyacentes de caña de azúcar también han sido afectados según lo demuestra la forma anormal de las cañas; muchos entrenudos diminutos superpuestos parecen un bastón de vértebras de tiburón o de carretes de hilo. La contaminación ambiental actuó como una inyección de hormonas que influyó con su impacto en detener el crecimiento meristemático y elongación de los entrenudos normales que forman las cañas.

#### El suelo como contaminante del aire

En 1965 Cassell (13) informó que alrededor de 30 millones de toneladas de polvo natural entran a la atmósfera de los Estados Unidos durante el año promedio. Wadleigh y Dyal (38) han informado que la mayor parte es producto de la erosión causada por el viento en los suelos. La parte árida de los suelos limosos de los Grandes Llanos de los Estados Unidos, que tiene un promedio anual de lluvia de 20 pulgadas y comprende parte de 10 estados: Montana, Wyoming, Colorado, Nuevo Méjico, Dakota del Norte, Dakota del Sur, Nebraska, Kansas, Oklahoma y Texas, es afectada por tormentas de polvo. Las más severas ocurrieron entre los años 1931 y 1938 en tiempo de sequías severas; de igual modo ocurrieron otras en 1950 y 1957. En muchos sitios hubo una erosión de 3 a 4 pulgadas del suelo superficial removido por el viento. El Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos ha tenido éxito en controlar y minimizar las pérdidas del suelo por erosión del viento adoptando prácticas relacionadas con el mejor uso de los suelos. El *San Juan Star* del 1 de agosto de 1972 informó que el Servicio Meteorológico de San Juan, Puerto Rico, lleva récord hace 15 años del polvo que vuela de oeste a este, del Desierto de Sahara, tres veces al año, el cual reduce la visibilidad y contamina el aire.



Fuente: Servicio Forestal de los E. U. en colaboración con el Negociado de Planos Reguladores de la Junta de Planificación de Puerto Rico.

Fig. 15- Algunas áreas naturales de Puerto Rico cuya preservación se recomienda. (Hay 260,000 cuerdas con potencial agrícola; el área en bosques ocupa 371,917 cuerdas, el 17.5% del total.)

## La quema anual de la paja de caña de azúcar en Puerto Rico

En Puerto Rico se viene quemando parcialmente la paja residual antes de la cosecha de caña desde 1950, y en su totalidad en la última década. Una tonelada de caña produce aproximadamente un promedio de 25% de paja en cosechas normales. En la última zafra del 1972 se cosecharon 4.4 millones de toneladas de caña; se quemó alrededor de 1.1 millones de toneladas de paja. En los años anteriores la producción de caña y de paja fue de 2 a 3 veces mayor. El aire se contamina anualmente en Puerto Rico, durante la zafra de azúcar, con enormes cantidades de bióxido de carbono, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y azufre que se liberan en la quema de los campos pre-cosechados. Los procesos biológicos del suelo que influyen en las relaciones normales de carbono-nitrógeno y de nitrógeno-azufre son afectados por la quema; el humus del suelo se destruye y esto reduce la fertilidad.

## El suelo como contaminante de las aguas

Un comité selecto del Senado de los Estados Unidos sobre los Recursos de Aguas Nacionales (37), ha informado que los sedimentos o sólidos en suspensión en las aguas que vienen por erosión de los suelos a los ríos son 700 veces mayor que las descargas de las aguas negras.

## Los sedimentos

Los daños causados por los sedimentos en las aguas y en la disminución de la capacidad de los embalses de aguas construidos para las plantas hidroeléctricas y/o riego y acueductos se estiman en \$500 millones en los Estados Unidos. El Secretario de Agricultura y el Director de la Oficina de Ciencia y Tecnología de los Estados Unidos (36) solicitaron en 1969 un presupuesto de \$3,760 millones para usarse, en 5 años, en un programa de investigación y desarrollo para el estudio de la contaminación causada por los sedimentos.

Los sedimentos provienen principalmente de la erosión de los campos cultivados, de las construcciones de caminos, carreteras, urbanizaciones, derrumbes, etc. El proceso de sedimentación llena y obstruye los lagos, embalses, ríos y canales; aumentan el costo de la purificación de las aguas para consumo, interfieren en los procesos manufactureros, destruyen las cosechas en tiempo de inundaciones, reducen la vida de los peces, ensucian las playas y los balnearios y absorben fósforo, plaguicidas y agentes químicos indeseables. La rapidez del movimiento de los sedimentos por erosión depende de la topografía, la lluvia y su intensidad y de la velocidad del flujo de las aguas. La cantidad de sedimentos liberados depende de la propiedad erosiva de las series de suelos en las cuencas hidrográficas. La erosión de los suelos se divide en dos tipos principales: la erosión laminar que ocurre cuando se pierden las capas superficiales del suelo o subsuelo y la erosión por cárcavas que ocurre cuando se forman zanjas profundas o barrancos.

En Puerto Rico se han construido 24 embalses de aguas para las plantas hidroeléctricas y/o servicio de riego y acueductos (fig. 3). Los datos revelan que solamente tres de esos embalses construidos entre los años 1913 y 1914 han reducido su capacidad de almacenamiento en un periodo de 48 a 49 años; el de Coamo en 95.3%; el de Guayabal en Villalba en 50.9%, y el de Patillas en 7.3%. El embalse del río Loco, construido en 1949-52, ha reducido su capacidad en 45.6% y el de Caonillas en Utuado, construido en 1948-52; el más grande con capacidad de 50,140 acres-pies se viene reduciendo a razón de 61.59 acres-pies por año. Su vida se estima en 276 años. Las series de suelos en las cuencas hidrográficas de estos embalses son erosivas. El único estudio geológico de sedimentación de un embalse en Puerto Rico fue hecho en el de Caonillas por Noll (25) en 1953. Los sedimentos son producto de la erosión laminar de los suelos de las series Utuado y Jayuya; cada pie cúbico de sedimento pesa un promedio de 38.1 libras con composición mecánica de 30.59% de arena, 53.85% de limo y 15.56% de arcilla. El Servicio de Conservación de Suelos ha hecho recomendaciones acertadas para minimizar las pérdidas de erosión

en los suelos cultivables de Puerto Rico. En los últimos años, la erosión ha sido acelerada por las labores de construcción de más caminos, carreteras, urbanizaciones, etc.

El fósforo traído por los sedimentos y los nitratos remanentes de los fertilizantes añadidos al suelo para alimentar la cosecha y resultantes del proceso biológico de nitrificación, contribuyen a la eutrofización de los lagos. Esto contribuye al mayor crecimiento de las algas, los jacintos y otras plantas acuáticas. No hay datos disponibles en Puerto Rico de las cantidades de fósforo y nitrógeno que tienen las aguas de los embalses ni para fósforo en los ríos. Sin embargo hay cientos de datos sobre los contenidos de nitratos para los ríos y pozos publicados por el U. S. Geological Survey (34); no sobrepasan generalmente de .3 mg/l y muy pocos suben hasta 20 mg/l. El límite recomendado por el Servicio de Salud de los Estados Unidos es 45 mg/l de nitratos ( $\text{NO}_3$ ).

#### Los agentes infecciosos y los compuestos orgánicos exóticos

Los agentes infecciosos relacionados con los suelos y las aguas son los virus, las bacterias y los hongos que causan enfermedades en las plantas, los seres humanos y los animales. Los compuestos químicos exóticos son los detergentes, los desperdicios industriales y los plaguicidas: insecticidas, fungicidas y herbicidas. El potencial de los plaguicidas como contaminantes del ambiente depende de sus propiedades tales como su concentración, su tendencia a evaporarse o a disolverse en agua y en otros solventes, y su grado de resistencia a descomponerse por los microorganismos del suelo. Los insecticidas se dividen en tres grupos: hidrocarburos clorinados, fosfo-orgánico y carbamatos. La Asociación Americana de Química (1) muestra las fórmulas estructurales para un número limitado de insecticidas y herbicidas importantes. Los insecticidas del primer grupo son resistentes a la descomposición. Ejemplo: el DDT tiene una media vida en el suelo de 6-8 años; es decir, pierde la mitad de su actividad cada 6-8 años. Los insecticidas de los otros dos grupos son tóxicos y se descomponen con facilidad. El análisis químico de los plaguicidas en aguas no es tarea fácil. Muchos, como los del grupo de hidrocarburos clorinados, se adhieren a las partículas de arcilla que vienen con los sedimentos. Otros se disuelven en las sustancias grasosas o forman complejos orgánicos difíciles de identificar. Las concentraciones máximas en agua de algunos insecticidas del grupo de hidrocarburos clorinados permisibles por el Servicio de Salud Pública de los Estados Unidos se informan en el cuadro 9.

Cuadro 9- Concentraciones máximas permisibles por el Servicio Público de Salud de los Estados Unidos para insecticidas del grupo de hidrocarburos clorinados presentes en las aguas.

Insecticidas	Concentración máxima a largo plazo mg/l
Endrín	.001
Aldrín	.017
Dieldrín	.017
Lindano	.056
Toxafeno	.005
Heptaclor	.018
Heptaclor epóxido	.018
DDT	.042
Clordano	.003
Metoxiclor	.035

## Suelos contaminados

Wadleigh y Dyal (38) presentaron una conferencia sobre *Suelos contaminados* en la asamblea anual de la Asociación Americana de Agronomía celebrada en Detroit, Michigan, en noviembre del 1969. Ellos se extrañaban que el Gobierno Federal asignó en 1968 la cantidad de \$4,946,000 para estudios sobre los efectos de la contaminación en las aguas: \$2,289,000 para el aire y solamente \$65,000 para los suelos. El recurso natural, suelos, debe tener igual prioridad que el aire y las aguas. Hay relación entre los tres y en sus efectos en la agricultura y mucha información disponible sobre los suelos. Ellos recomiendan a los especialistas de suelos cooperar en adoptar tres normas que requieren evaluación: 1- Cuando el suelo está contaminado; 2- Cuando actúa como descontaminante y 3- Cuando contamina el aire y las aguas. Mencionan algunas alteraciones desfavorables del ambiente que producen suelos contaminados tales como residuos de plaguicidas, la presencia de microorganismos portadores de enfermedades, la infertilidad, la acumulación de sales, nitratos y metales pesados y el uso del estiércol. El suelo sirve de índice para determinar su contaminación; pero la respuesta final lo dice la reacción de la planta. Muchas cosechas y variedades de plantas son dañadas cuando crecen en un suelo contaminado; otras son afectadas a menor grado por ser más tolerantes a los efectos tóxicos de la contaminación.

## Plaguicidas persistentes en los suelos

Los plaguicidas más persistentes son los insecticidas del tipo de hidrocarburos clorinados como DDT, aldrín, dieldrín, endrín, heptaclor, lindano, etc. Los insecticidas fosforgánicos como: malación, paración, etc. y los del tipo carbamato, se descomponen rápidamente. La mayoría de los herbicidas son descompuestos por los microorganismos del suelo; algunos son muy persistentes. Los plaguicidas persisten mayor tiempo en los suelos que tienen un alto contenido de materia orgánica que en los suelos minerales y arenosos. El plaguicida es menos efectivo en un suelo orgánico y "muck" que tiene alrededor de 50% de materia orgánica que en un suelo arenoso. Los factores que afectan la acumulación de los plaguicidas en los suelos son: el plaguicida en sí y su concentración; el tipo o serie de suelo; la humedad; la temperatura; el cultivo; los microorganismos; el movimiento del aire y del viento; las cosechas que cubren el suelo y el método de aplicación. Los residuos de plaguicidas persistentes permanecen muchos años en los suelos; contaminan los microorganismos; pasan a la cosecha y a la cadena de alimentos. Su larga persistencia en los suelos es motivo de preocupación; ya que se acumulan en las lombrices en concentraciones de 1 ppm, en los peces y en los tejidos grasos de los animales y de los seres humanos. Liu y otros (23) estudiaron la persistencia de cuatro herbicidas bajo condiciones de invernadero en 13 tipos de suelos de Puerto Rico usando la planta de avena (*Avena sativa L.*) como indicadora en seis cosechas sucesivas. El atrazine y el ametryne fueron dos de los herbicidas de persistencia intermedia. El primero es un tanto más persistente en la mayoría de esos suelos. El grado de persistencia resultó ser más bajo en los suelos con un contenido más alto en materia orgánica. Se atribuye a una actividad desintoxicadora microbiana mayor.

Los plaguicidas son importantes para defender las cosechas de los ataques de insectos y de las enfermedades y de la competencia de las malas yerbas. No pueden eliminarse; pero es necesario controlar su aplicación para evitar que no se concentren en los alimentos que producen las cosechas. El Departamento de Agricultura de los Estados Unidos ha logrado por medio del análisis químico algún progreso en controlar esta situación. En Puerto Rico las piñas sembradas en suelos arenosos infectados con nemátodos no producen frutas. Hay que fumigar el suelo con el nematocida DD.

## Origen de los agentes infecciosos en los suelos

Los agentes infecciosos que habitan los suelos: los virus, las bacterias y los hongos, tienen su origen en las aguas negras, en las cosechas enfermas y en los desperdicios de animales, mataderos y tenerías que son las industrias que usan tanino.

## Sales, minerales e infertilidad de los suelos

Las sales comunes, los ácidos, los álcalis, las sales de los metales pesados y los cianuros, contaminan los suelos y las aguas. Se originan de depósitos naturales, del drenaje de aguas ácidas de las minas, de los procesos industriales y de las aguas de riego. Tienen efecto dañino en las cosechas; son tóxicos a los humanos, los animales y las aves; producen malos olores y sabores en las aguas y corroen el equipo mecánico. La agricultura sobrevive en una zona árida bajo riego si se establece un balance favorable de las sales que entran y las que salen. El Departamento de Agricultura y las universidades estatales de los Estados Unidos (32) informan que alrededor de tres millones de toneladas de ácido sulfúrico entran a los ríos de los Estados Unidos anualmente de las empresas mineras ácidas. La acidez producida por el azufre al oxidarse en presencia de agua, hace daño a las cosechas. En Puerto Rico hay que tener sumo cuidado en evitar que los desperdicios de las minas de cobre en Utuado, Jayuya, Lares y Adjuntas, cuando empiecen a funcionar, acidulen los suelos y las aguas y produzcan daños a las cosechas.

Algunos suelos fértiles, mal manejados, que no reciben fertilizantes por un número de años, pueden convertirse en infértils; producen cosechas de rendimientos bajos y calidad pobre. Esto puede ocurrir si no se contrarresta la controversia establecida recientemente sobre el efecto de los fertilizantes en causar la contaminación de las aguas naturales. Nelson (24) ha informado que los datos limitados disponibles indican que las pérdidas de nitratos y fosfatos mencionadas por los ecólogos ambientales como causantes de contaminación de las aguas, son mínimas en la mayoría de los casos. Cuando esto ocurre su control se facilita regulando la cantidad y el tiempo de aplicación de los fertilizantes y el riego usando también fertilizantes que liberen despacio el nitrógeno y aplicando prácticas de conservación de suelos que eviten pérdidas de los nutrientes solubles.

No hay suficientes pruebas para sostener que los metales pesados tales como el cobre, mercurio, plomo y cadmio, contaminen los suelos como ocurre en las aguas naturales y en los ríos. Estos metales pesados son nocivos a los peces, los seres humanos y a las plantas.

### El suelo como descontaminante

Webber (39) ha informado que los suelos bien drenados ofrecen condiciones favorables a los microorganismos, si se mantienen húmedos, para degradar biológicamente de 280 a 336 kg. de oxígeno por hectárea, igual a 250-300 libras por acre, durante el tiempo que dura una cosecha. Un volumen promedio de 473,000 libras igual a 125,000 galones o 493 metros cúbicos o a .4 de acre-pie de aguas negras contiene 136.2 kg. o 300 libras de oxígeno.

Parisek y otros (26) informaron en 1967 que los estudios excelentes realizados en la Universidad de Pennsylvania demuestran que los afluentes de aguas negras contaminadas son beneficiosos cuando se usan para el riego de cosechas en suelos bien drenados. Hay pruebas para demostrar que los suelos son muy efectivos en remover o destruir los organismos patógenos que entran con las aguas negras y con los desperdicios de animales. En 1972 Bonnet (11) publicó su artículo *Los suelos contrarrestan los efectos de contaminación del cobre y el azufre en las fuentes fluviales*.

## PRUEBAS SOBRE SUELOS CONTAMINADOS EN PUERTO RICO

Hay pruebas sobre suelos contaminados debido a efectos de fungicidas, sales, ecológicos, físicos, de construcciones, desperdicios industriales, subida del nivel freático y quema anual de la paja de caña de azúcar como se explica en este capítulo.

### Efecto de fungicidas

Dubey (16) ha informado que 19 aplicaciones de los fungicidas: maneb, zinab y de cobre tri-básico, a una cosecha de tomates sembrada en una finca de la Central Aguirre al sur de Puerto Rico, en 1968, contaminó al suelo. Una próxima cosecha de caña de azúcar creció con mucha dificultad; se

marcitol y murió en los predios del suelo donde se acumularon los fungicidas. La caña creció bien en los sitios adyacentes no afectados.

## Efecto de sales

Bonnet (6) explica en su libro: *Edafología de los suelos salinos y sódicos*, publicado en 1960, el efecto de las sales en los suelos y en las cosechas. Bonnet y Brenes (5) informaron en 1958, que en la zona semiárida del Valle de Lajas, al suroeste de Puerto Rico, hay 8,835 acres de suelos contaminados con sales. El Distrito de Riego que se estableció luego cubre 19,769 acres de suelos normales (fig. 3). Una nueva clasificación de suelos hecha y publicada en 1965 por el Servicio de Conservación de Suelos (30) del área, reduce los suelos contaminados por sales a 5,407 acres representados por las series Fe, Cartagena y Teresa, en la zona de riego. La contaminación de estos suelos se debió a sales del mar atrapadas en el subsuelo por cambios geológicos. Bonnet y Roberts (7) informaron en 1967 que hay 5,756 cuerdas contaminadas con sales en el área del Caño Tiburones, en Arecibo, propiedad de la Autoridad de Tierras de Puerto Rico. Estos suelos incluyen las series ácidas: Tiburones muck y Factor muck, que son orgánicos, y Martín Peña, Palmas Altas y Piñones, que son minerales-orgánicos. La contaminación se debe a filtración del agua del mar debido a la topografía baja y al manejo inadecuado de la hidrología de la región.

## Efecto ecológico

Estudios hechos por Bonnet y Roberts (9), en 1968 de las fincas propiedad de la Autoridad de Tierras de Puerto Rico, en la zona Río Grande-Loíza, revelaron un cambio ecológico en una serie de suelo a otra serie, debido a contaminación del agua de mar. Un área de 92 cuerdas de la finca Blasina, clasificada en la década del 1940 como el tipo Coloso franco limo-arcilloso, que era productivo cambió al tipo de suelo improductivo, clasificado como Piñones franco limo-arcilloso contaminado con sales. El suelo Coloso estuvo sembrado con caña de azúcar hasta 1952, protegido por un sistema continuo de bombeo para evitar las filtraciones del agua de mar durante el alza de las mareas. La bomba dejó de funcionar después del 1952. El cambio ecológico ocurrió dentro de un periodo de 10 años. Se manifiesta ahora por la vegetación actual tolerante a la sal y por algunos árboles de mangla que han crecido. Una fotografía aérea tomada en 1952 comparada con otra tomada en 1962 revela el cambio ecológico.

## Efecto físico

Se observó también en un área del tipo de suelo Coloso franco limo-arcilloso de dicha finca Blasina, sembrado en pastos, una alteración o contaminación de la estructura normal del suelo superficial. Las huellas de las pezuñas del ganado y lo compacto que estaba el suelo debido al peso del ganado y pastoreo excesivo bajo condiciones húmedas, lo hizo más impermeable a las aguas de drenaje; es decir, lo contaminó. La nivelación y la mecanización de los suelos debe hacerse con cuidado para no afectar su estructura.

En los trópicos húmedos el corte de los bosques para dedicar el área a cultivos de cosechas productivas produce cambios de textura y estructura en los suelos debido al impacto de las gotas de lluvia que humedecen el suelo al cesar la estación seca.

### Efecto de las construcciones

Las estadísticas sin publicar del Servicio de Conservación de Suelos en Puerto Rico, revelan que entre 1958 y 1967, se dedicaron 17,698 acres de suelos a construcciones; un promedio de 1,770 por año. Estimo que hasta el 1971 la cifra subió a un mínimo de 24,778 acres. Estas construcciones yacen sobre

las mejores tierras agrícolas de Puerto Rico, contaminadas con concreto, como se puede apreciar en las llanuras costeras e interiores. Esta planificación inadecuada ha producido cambios en la hidrología de esas llanuras que han contribuido a la expansión de las inundaciones en las bajuras en los períodos de las grandes lluvias.

#### Efecto de los desperdicios industriales

Los desperdicios industriales de los ingenios azucareros de Puerto Rico: cachaza, ácidos y soda caustica, mieles y guarapo fermentado, han destruido gran parte de los manglares que han protegido las costas de la erosión marina. Muchos árboles de mangle han muerto; los suelos que los sostienen han sido contaminados. La Autoridad de las Fuentes Fluviales (28), informa que quedan 16,500 acres de manglares de los 65,000 acres que había originalmente.

#### Efecto de la subida del nivel freático

Bonnet (10) informó a principios del 1972 que en la nueva clasificación de suelos de Puerto Rico iniciada en 1966, casi terminada y no publicada aún, hecha por el Servicio de Conservación de Suelos, se describe un perfil típico del tipo de suelo, Coloso franco limo-arcilloso y se informa que su nivel freático varía en profundidad entre 24 y 48 pulgadas. En la clasificación de suelos de Puerto Rico publicada por Roberts (29), en 1942, se dice que la serie de suelo Coloso localizada en los llanos de la parte norte cubría 41,728 acres y que su nivel freático varía entre 30 y 40 pulgadas. El nivel freático subió por lo tanto, 6 pulgadas dentro de los 24 años incluidos entre 1942 y 1966. La mayoría de estos suelos han estado siempre sembrados con caña de azúcar. El rendimiento de azúcar ha mermado en 5% por tonelada de caña en esos 24 años. La subida del nivel freático es debido a las construcciones de viviendas, industrias y de carreteras rellenadas sobre el nivel natural del drenaje de las fincas, que han afectado la hidrología natural de la región. La subida del nivel freático ha afectado la buena aeración del sub suelo y contaminado la atmósfera de la zona radical afectando la calidad de la cosecha y la producción de azúcar.

### COMENTARIO FINAL

Los suelos son recursos naturales nacionales y privados. Su conservación ha recibido buena atención en los países agrícolas progresistas y desarrollados; pero también en éstos y principalmente en los países subdesarrollados han sido explotados y manejados inadecuadamente. Los problemas relacionados con la contaminación del aire, de las aguas y de los suelos, influyen en producir rendimientos y calidad pobres de las cosechas que pueden afectar la salud y el bienestar de los hombres y los animales. El interés público y el bienestar humano requieren que todos los propietarios públicos y privados de terrenos manejen y cuiden bien el suelo y el agua bajo su control de modo que aseguren y proporcionen regocijo y bienestar plenos a las generaciones futuras. Aplíquense las recomendaciones del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos relacionadas con buenas prácticas y manejo de los suelos para minimizar las pérdidas por erosión que liberan sedimentos que contaminan las aguas.

## R E F E R E N C I A S

1. American Chemical Society, *Cleaning our Environment, The Chemical Basis for Action*. A report by the Sub-Committee on Chemistry and Public Affairs, Washington, D. C., 249 p., 1969.
2. American Public Health Association, American Water Works Association and Water Pollution Control Federation, *Standard Methods for the Examination of Water and Waste Water*, 874 p., 13th ed., 1971, 1015 Eighteenth St., N. W., Washington, D. C., 20036
3. Ayala, Zulma, *Environmental Problem Caused by the Effluents of the Rum Industry in Puerto Rico*. A paper, 7 p. presented at the meeting held by the Institute of Chemical Engineers of Puerto Rico, Jul. 15, 1971, at San Juan, P. R.
4. Bonnet, J. A., *Nitrogen Transformations in the Decomposition of Sugar Cane Trash with Special Bearing upon Puerto Rico's Soil Problems*, J. Dept. Agr. of P. R., 15 (2) : 113-146, Apr. 1931.
5. Bonnet, J. A. y Brenes, E. J., *Estudio detallado sobre salinidad en el Valle de Lajas, Puerto Rico*, Estación Experimental Agrícola, Univ. de P. R., Bol. 141, 114 p., 2 mapas, 1958.
6. Bonnet, J. A., *Edafología de los suelos salinos y sódicos*, 337p., 1960, Estación Experimental Agrícola, Univ. de P. R., Río Piedras, P. R.
7. Bonnet, J. A., and Roberts, R. C., *Soil Survey and Salinity Study of the Farms in the Caño Tiburones Area, Arecibo, Puerto Rico*, Submitted to the Land Authority of Puerto Rico, Oct. 11, 1967, 137 p., 3 maps, 3 figs. Appendix, 15 p.
8. Bonnet, J. A., *La ciencia del suelo*, 249 p., 1968, Colegio de Ingenieros, Arquitectos y Agrimensores de Puerto Rico, G. P. O. Box 3845, San Juan, P. R., 00936.
9. Bonnet, J. A., and Roberts, R. C., *Soil Survey and Salinity Study of the Farms in the Loiza-Río Grande Area, Puerto Rico*. Submitted to Land Authority of Puerto Rico, Jul. 1, 1968, 149 p., 2 maps, 8 photos.
10. Bonnet, J. A., *Importancia del drenaje para la producción óptima del azúcar*, Revista del Colegio de Ingenieros, Arquitectos y Agrimensores de Puerto Rico, 22 (1) : 9-12, marzo 1972.
11. Bonnet, J. A., *Los suelos contrarrestan los efectos de contaminación del cobre y el azufre en las fuentes fluviales*, Revista del Colegio de Ingenieros, Arquitectos y Agrimensores de Puerto Rico, 22 (1) : 13-14, 1972.
12. Buckman, H. O., y Brady, N. C., *Naturaleza y propiedades de los suelos*. Traducción del inglés por R. Salord Barceló, 590 p., 1966, Unión Tipográfica Editorial Hispano Americana (UTEHA), México.
13. Cassell, H. J., *Polluted Air and Health*, Nat. Tuberculosis Ann, Bul., Jan., p. 11-13, 1965.
14. Committee Soil, *Science in Relation to Water Resources Development, — Responsibility of Soil Science in Water Quality Improvement*, A report, Soil Science Society of America Proceedings 34 (3), May-June 1970, p. 542-48.
15. Departamento de Sanidad del Estado de Nueva York, *Manual de tratamiento de aguas negras*, 304 p., 1964, Editorial Limusa Wiley, S. A., México, D. F.
16. Dubey, M. D., *A Nitrogen Deficiency Disease of Sugar Cane Probably Caused by Repeated Pesticide Application*, Phytopathology, 60 (3) : 485-487, Mar. 1970.
17. Environmental Protection Agency, *National Primary and Secondary Ambient Air Quality Standards*, Federal Register 36 no. 84, part II, p. 8186-8201, Apr. 30, 1971, Washington, D. C.
18. Foy, C. L., *Plants and Pollution*, p. 37-59, Amer. Soc. of Agronomy, Agronomy and Health, Spec. Pub. 16, 59 p., 1970.
19. Junta Sobre la Calidad Ambiental, *Estado Libre Asociado de Puerto Rico*, Oficina del Gobernador, Informe Ambiental, 1971, 165 p., 1972, 75 p.
20. Lair, M. D., Rogers, R. G., Weldon, M. R., *Environmental Effects of Petrochemical Waste Discharges on Tallaboa and Guayanilla Bays*, Puerto Rico, Environmental Protection Agency, Region IV, Surveillance and Analysis Division, Athens, Georgia, Technical Study TS 03-7-208-02, 47 p., plus 53 p. in Appendices, Oct. 1971.
21. Life Nature Library, *The Sea*, 190 p., by Leonard Engel and the Editors, Time-Life Books, New York.
22. Life, June 23, 1972, p. 41-42.
23. Liú, L. C., Cibes-Viadé, H. and González Ibañez, J., *The Persistence of Atrazine, Ametryne, Prometryne and Diuron, in Soils Under Greenhouse Conditions*, J. Agr. Univ. P. R., 54 (4) : 631-639, Oct. 1970.

24. Nelson, L. B., *Agricultural Chemicals in Relation to Environmental Quality; Chemical Fertilizers, Present and Future*, J. Environmental Quality, vol. 1 (1) : 2-6, 1972, American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin.
25. Noll, John J., *The Silting of Caonillas Reservoir*, Puerto Rico, Soil Conservation Service SCS TP-11, 22 p., Oct. 1953, Washington, D. C.
26. Parisek, R. R., Kardos, L. T., Sopper, W. E., Myers, E. C., Davis, D. E., Farrell M. A., and Nesbitt, J. B., *Waste Water Renovation and Conservation*, The Pennsylvania State Univ. Studies, no. 23, 71 p., 1967.
27. Puerto Rico Aqueduct and Sewer Authority, Production Division, under contract with Dept. of Health of Puerto Rico, *Pollution Survey, San Juan Bay Monitoring*, 1968-1969, 6 p. plus 13 p. in the Appendix and 5 figs.
28. Puerto Rico Water Resources Authority, *Aguirre Power Plant Complex, Environmental Report*, 198 p., April 1972.
29. Roberts, R. C., U. S. Department of Agriculture and party in coop. with Univ. of Puerto Rico Agricultural Experiment Station, *Soil Survey, Puerto Rico, Series 1936*, no. 8, issued Jan. 1942, 503 p. with maps.
30. Soil Conservation Service, U. S. Dept. of Agriculture in coop. with Univ. of Puerto Rico Agricultural Experiment Station, *Soil Survey, Lajas Valley Area, Puerto Rico, Series 1961*, no. 23, issued Apr. 1965, 170 p., 18 maps and legend.
31. *Soil Science Society of America Proceedings*, vol. 34, no. 3, May-Jun. 1970, 550 p.
32. U. S. Department of Agriculture and State Universities and Land Grant Colleges, *A National Program for Environmental Quality Pollution in Relation to Agriculture and Forestry*, 111 p., 1968.
33. U. S. Department of Health, Education and Welfare, Public Health Service, Consumer Protection and Environmental Health Service, National Air Pollution Control Administration, *Air Quality Criteria for Sulfur Oxides*, 178 p., Jan. 1969, Washington, D. C.
34. U. S. Geological Survey in coop. with Commonwealth of Puerto Rico, *Water Records of Puerto Rico*, 1958-1963, 353 p., and 1964-1967, vol. 1, 269 p.
35. U. S. Geological Survey in coop. with Commonwealth of Puerto Rico, *Water Resources of Puerto Rico, A Progress Report, Water Resources Bul. no. 4*, 102 p., with 16 p. in the Appendix and a hydrogeologic map, 1964.
36. U. S. Secretary of Agriculture and the Director of the Office of Science and Technology, *A Report to the President, Control of Agriculture-related Pollution*, 102 p., 1969, Washington, D. C.
37. U. S. Senate Select Committee on National Water Resources, 1960, *Water Resources Activities in the United States, Pollution Abatement Comm. Print no. 9*, 86th Congress, 2nd Session, 38 p.
38. Wadleigh, C. H., and Dyal, R. S., *Soils and Pollution*, p. 9-24, Amer. Soc. of Agronomy, Agronomy and Health, Spec. Pub. 16, 54 p., 1970.
39. Webber, L. R., *The Nature of the Problem: Soil Pollution*, Ontario Pollution Control Conference, Dec. 4-6, 1967, Ontario, Canada.

Se terminó de imprimir este libro el día  
11 de febrero de 1974 en los Talleres de  
Artes Gráficas del Departamento de Ins-

trucción Pública, San Juan, Puerto Rico.

