

# TABLA DE CONTENIDO

|            |                                                                 |           |
|------------|-----------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>3.1</b> | <b>Introducción .....</b>                                       | <b>1</b>  |
| <b>3.2</b> | <b>La precipitación.....</b>                                    | <b>1</b>  |
| <b>3.3</b> | <b>Los cuerpos de agua .....</b>                                | <b>6</b>  |
| 3.3.1      | Aguas superficiales.....                                        | 6         |
| 3.3.2      | Agua subterránea .....                                          | 12        |
| 3.3.2.1    | Acuíferos de la Costa Norte .....                               | 12        |
| 3.3.2.2    | Acuíferos aluviales.....                                        | 17        |
| 3.3.2.3    | Acuíferos de los valles interiores .....                        | 19        |
| 3.3.2      | Estuarios.....                                                  | 21        |
| <b>3.4</b> | <b>Ecosistemas de agua dulce .....</b>                          | <b>25</b> |
| 3.4.1      | La fauna nativa y exótica .....                                 | 25        |
| 3.4.2      | Embalses o lagos artificiales.....                              | 29        |
| 3.4.3      | Ciclos de vida .....                                            | 31        |
| <b>3.5</b> | <b>Uso de agua en Puerto Rico .....</b>                         | <b>36</b> |
| 3.5.1      | Ciclo hidrológico .....                                         | 38        |
| 3.5.2      | Escorrentía superficial .....                                   | 40        |
| 3.5.3      | El concepto de rendimiento seguro.....                          | 42        |
| 3.5.4      | Requerimiento de flujos ambientales.....                        | 43        |
| 3.5.5      | Rendimiento seguro de tomas superficiales .....                 | 44        |
| 3.5.6      | Rendimiento seguro de embalses .....                            | 46        |
| 3.5.7      | Rendimiento seguro de los principales acuíferos .....           | 49        |
| <b>3.6</b> | <b>Enfoque para mejorar la disponibilidad del recurso .....</b> | <b>50</b> |
| <b>3.7</b> | <b>Cambio climático .....</b>                                   | <b>51</b> |

# CAPÍTULO 3

## EL RECURSO AGUA EN PUERTO RICO

---

### 3.1 Introducción

En Puerto Rico el recurso agua tiene una variación significativa en su distribución en el tiempo y espacio. La combinación de la variabilidad en su disponibilidad, junto con la demanda creciente por sus usos y las ineficiencias en su aprovechamiento, han hecho del agua un recurso que experimenta escasez. El flujo máximo en los ríos de Puerto Rico típicamente es 1,000 veces



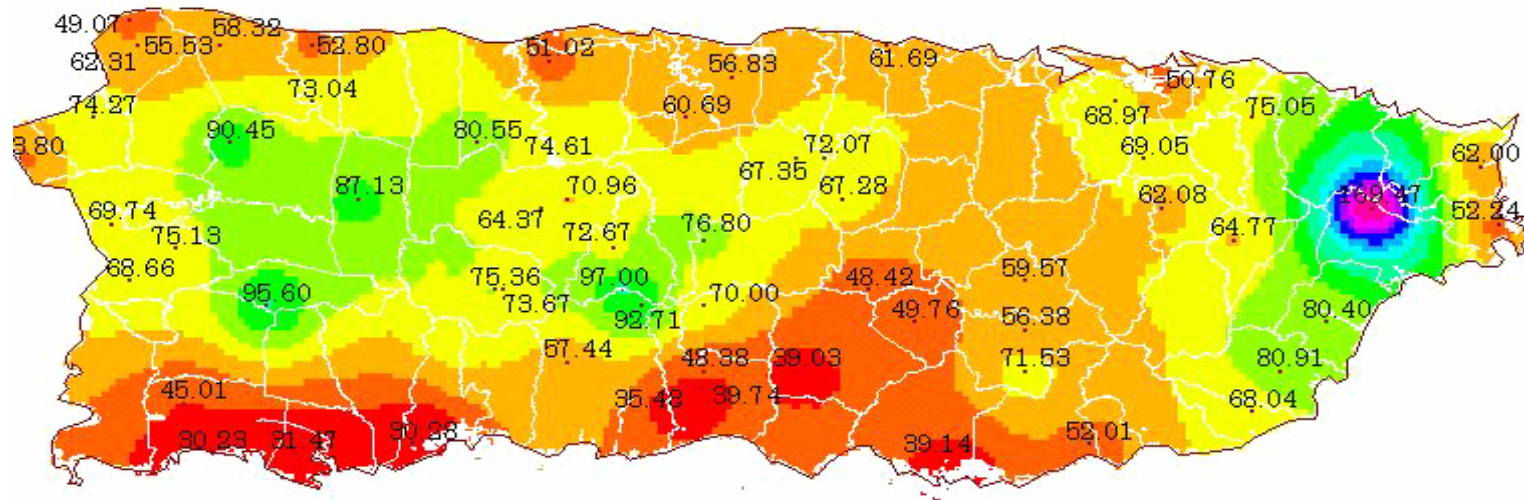
mayor que el flujo mínimo; una parte sustancial del agua fluye hacia el mar a consecuencia de las crecidas grandes, mientras los caudales merman sustancialmente durante el estiaje. Este capítulo presenta una descripción general de las características hídricas de Puerto Rico y los patrones de aprovechamiento.

### 3.2 La precipitación

La Isla experimenta una variación significativa respecto a la distribución espacial y temporal de la precipitación pluvial y la escorrentía resultante de ésta. El patrón geográfico de la lluvia en Puerto Rico presenta un contraste entre la costa norte, con unas 70 pulgadas de lluvia anual, y la costa sur, con unas 35 pulgadas de lluvia anual (véase Ilustración 3.1).



## Precipitación Promedio para Puerto Rico 1970-2000



Precipitación anual en  
pulgadas

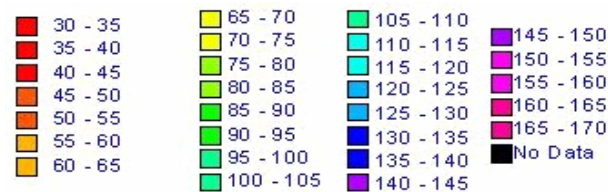
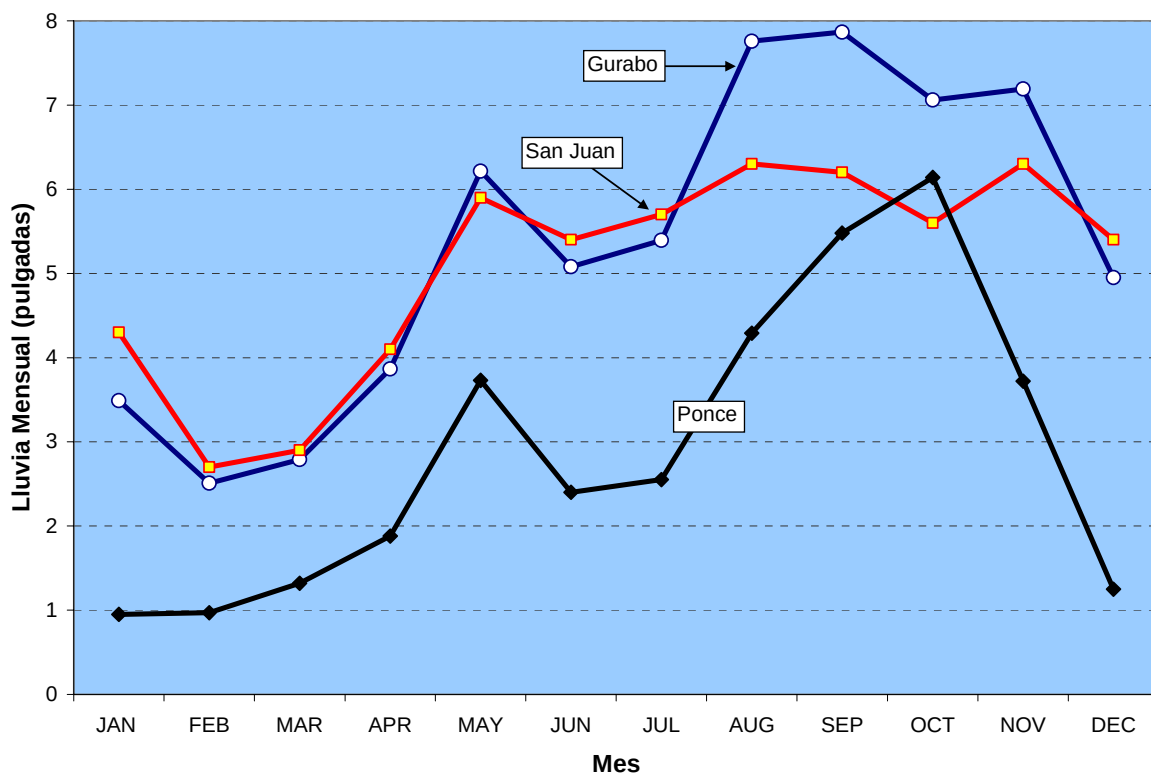


Ilustración 3.1 Patrón geográfico de  
lluvia en Puerto Rico

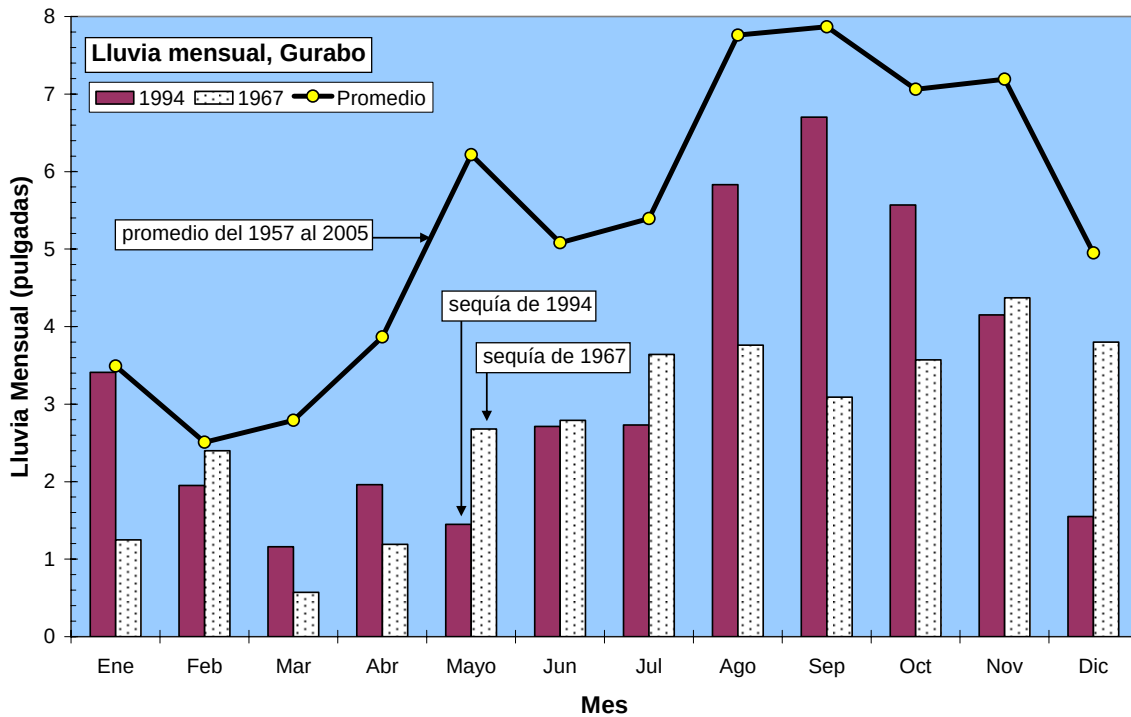
Fuente: Servicio Nacional de Meteorología, 2006

La precipitación en Puerto Rico presenta un patrón estacional. La Ilustración 3.2 permite observar que el mes de mayo y el período de agosto a noviembre se caracterizan por una precipitación relativamente alta mientras que el periodo de estiaje de enero a marzo es mucho más seco. La reducción normal de lluvia y caudal en los ríos durante el estiaje no debe confundirse con eventos de sequía. Las sequías corresponden a periodos cuando la humedad es sustancialmente menor a lo normal. Las más impactantes en Puerto Rico corresponden a una reducción marcada en la lluvia durante los periodos del año normalmente húmedos.



**Ilustración 3.2 Lluvia promedio mensual en San Juan, Gurabo y Ponce. Fuente de datos: Servicio Nacional de Meteorología, San Juan**

La Ilustración 3.3 muestra la precipitación para el año seco de 1994 y los compara con los datos de precipitación promedio en la estación de medición del Servicio Nacional de Meteorología en San Juan. Los patrones en años de sequía son distintos al promedio; las sequías registradas en Puerto Rico típicamente se inician al faltar las lluvias que caen entre mayo y septiembre, como se puede apreciar de los datos de lluvia del año 1994.



**Ilustración 3.3 Comparación de la precipitación en años de sequía (1967 y 1994) con el promedio, Subestación de Gurabo, cuenca del embalse Carraízo. Fuente: Servicio Nacional de Meteorología, San Juan.**

Las sequías en Puerto Rico que afectan a los abastos de agua se inician típicamente con la reducción en las lluvias durante los meses de abril y mayo, y en las sequías de mayor severidad la precipitación no es suficiente para llenar los embalses antes de finalizar el año. Durante los periodos de sequía de 1967-68 el Embalse Carraízo no alcanzó llenarse a capacidad por más de un año, a pesar de haberse reducido sustancialmente la tasa de extracción. Durante la sequía de 1994-95 el Embalse Carraízo se llenó, pero La Plata no alcanzó el nivel máximo de capacidad por un periodo de casi dos años, según se muestra en la Ilustración 3.4.

El Estudio de Larsen (2000) indica que a partir de 1950 ocurrieron 8 de los 10 años con menor lluvia durante el siglo 20 (véase Tabla 3.1). Sin embargo, debido a que la severidad de la sequía varía de una parte de la Isla a otra, estos datos no reflejan el efecto severo que puede tener una sequía en alguna cuenca en particular. Es decir, la severidad de la sequía en una cuenca en particular puede ser peor que la

ilustrada como el promedio de la Isla. Los periodos con lluvia menor de lo normal en la Región del Caribe coinciden con variaciones en el fenómeno El Niño durante el invierno y una reducción en el número e intensidad de los huracanes.

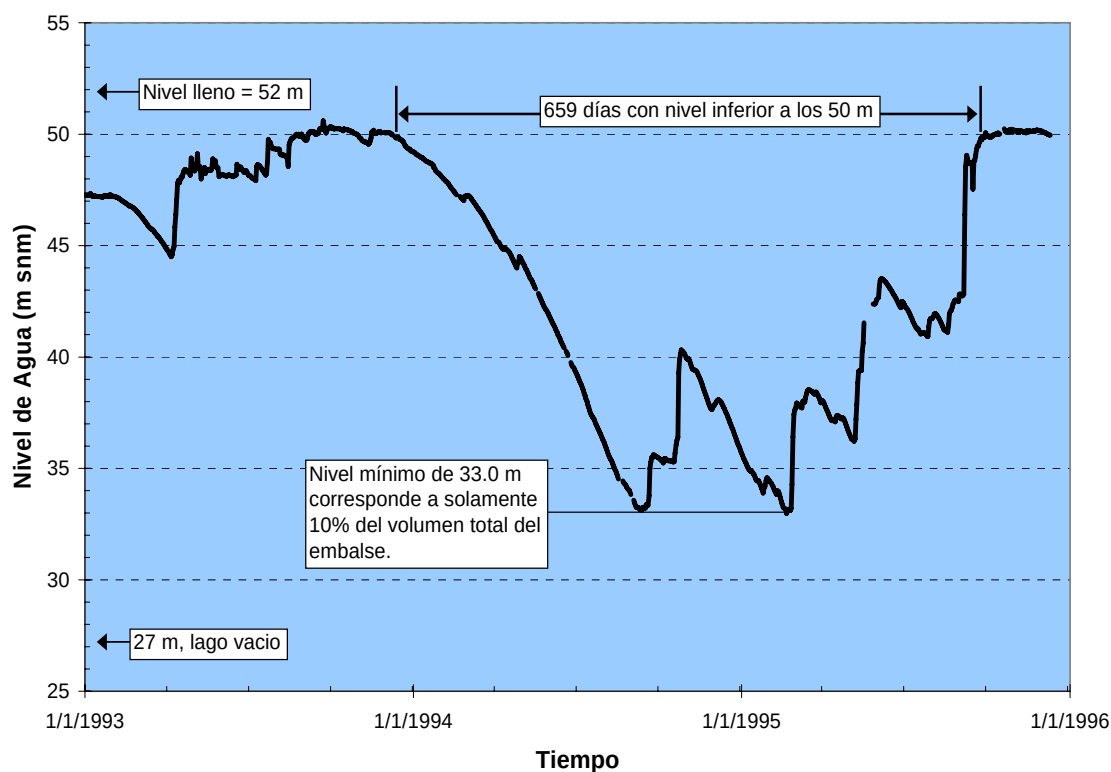


Ilustración 3.4 Niveles del embalse La Plata (1993-1996). Fuente: USGS

Tabla 3.1 Los diez años con menor lluvia en Puerto Rico, 1900-1999 (Larsen, 2000)

| Orden de Severidad | Año  | Lluvia anual promedio de 12 estaciones (pulgadas) | Lluvia como porcentaje del promedio |
|--------------------|------|---------------------------------------------------|-------------------------------------|
| 1                  | 1967 | 41.9                                              | 74%                                 |
| 2                  | 1997 | 44.9                                              | 80%                                 |
| 3                  | 1994 | 46.1                                              | 82%                                 |
| 4                  | 1964 | 49.4                                              | 88%                                 |
| 5                  | 1976 | 49.6                                              | 88%                                 |
| 6                  | 1991 | 49.6                                              | 88%                                 |
| 7                  | 1930 | 51.5                                              | 91%                                 |
| 8                  | 1980 | 51.9                                              | 92%                                 |
| 9                  | 1947 | 52.8                                              | 94%                                 |
| 10                 | 1957 | 53.2                                              | 94%                                 |

## 3.3 Los cuerpos de agua

### 3.3.1 Aguas superficiales

Puerto Rico cuenta con 224 ríos y 553 quebradas con nombres. Muchos de estos ríos y quebradas son tributarios de otros, como en el caso del Río Grande de Loíza cuya cuenca incluye los ríos Canóvanas, Canovanillas, Bairoa, Turabo, Gurabo, Cagüitas y Valenciano, más un gran número de quebradas. Existen 55 ríos que descargan hacia el mar (véase Ilustración 3.5) y las características de 24 de éstos se presentan en la Tabla 3.2. En Culebra y Vieques no hay ríos.



En Puerto Rico no hay lagos naturales, pero existen 37 embalses, 14 de ellos considerados obras mayores (véase Tabla 3.3). El primer embalse, Carite, se construyó en el año 1913, mientras que el más reciente, el embalse del Río Fajardo, comenzó a operar en el 2006. Actualmente se está construyendo un nuevo embalse en el Río Blanco de Naguabo y en etapa de

planificación se encuentran los embalses en el Río Valenciano y Quebrada Beatriz en Caguas. Una característica distintiva de dos de estos embalses nuevos es que han sido construidos fuera del cauce del río para reducir la sedimentación y los impactos ambientales. Varios de los embalses pequeños ya están totalmente sedimentados. La Tabla 3.3 presenta información general sobre los embalses y sus ubicaciones se muestran en la Ilustración 3.6.



La Laguna Tortuguero y la Laguna Cartagena son lagunas naturales de agua dulce, las únicas que quedan en la Isla. La Laguna Guánica también tenía agua dulce antes de ser drenada en el año 1952 para aumentar el área de producción agrícola en el Valle de Lajas. El Caño Tiburones también fue drenado para uso agrícola.

**Tabla 3.2 Características de los ríos principales**

| Nombre                 | Área               |                    | Largo del río |        | Caudal Anual     |         |
|------------------------|--------------------|--------------------|---------------|--------|------------------|---------|
|                        | (mi <sup>2</sup> ) | (km <sup>2</sup> ) | (millas)      | (Km.)  | (acres-pies/año) | (MGA)   |
| Río Guajataca          | 54.99              | 142.42             | 26.31         | 42.34  | 70,830           | 23,078  |
| Río Grande de Arecibo  | 259.61             | 672.39             | 32.57         | 52.42  | 348,160          | 113,441 |
| Río Grande de Manatí   | 234.82             | 608.18             | 56.82         | 91.45  | 275,820          | 89,870  |
| Río Cibuco             | 91.57              | 237.17             | 23.75         | 38.22  | 88,620           | 28,875  |
| Río de La Plata        | 241.20             | 624.71             | 62.19         | 100.08 | 210,530          | 68,597  |
| Río de Bayamón         | 89.89              | 232.82             | 30.29         | 48.75  | 92,910           | 30,273  |
| Río Piedras            | 26.00              | 67.34              | 10.65         | 17.14  | 61,920           | 20,175  |
| Río Grande de Loíza    | 289.95             | 750.97             | 44.05         | 70.89  | 236,890          | 77,186  |
| Río Espíritu Santo     | 26.17              | 67.78              | 12.59         | 20.26  | 122,140          | 39,797  |
| Río Mameyes            | 15.58              | 40.35              | 9.49          | 15.27  | 93,050           | 30,318  |
| Río Fajardo            | 26.18              | 67.81              | 16.35         | 26.31  | 75,900           | 24,730  |
| Río Blanco             | 27.67              | 71.67              | 9.24          | 14.86  | 82,280           | 26,809  |
| Río Grande de Patillas | 29.05              | 75.24              | 14.58         | 23.46  | 63,170           | 20,583  |
| Río Nigua (Salinas)    | 52.76              | 136.65             | 10.48         | 16.87  | 15,740           | 5,129   |
| Río Coamo              | 83.99              | 217.53             | 23.29         | 37.48  | 18,840           | 6,139   |
| Río Jacaguas           | 59.85              | 155.01             | 24.68         | 39.72  | 39,310           | 12,808  |
| Río Bucaná             | 28.45              | 73.69              | 5.69          | 9.16   | 54,830           | 17,865  |
| Río Portugués          | 20.33              | 52.65              | 18.43         | 29.66  | 19,200           | 6,256   |
| Río Guayanilla         | 25.14              | 65.11              | 15.51         | 24.96  | 50,540           | 16,467  |
| Río Yauco              | 46.09              | 119.37             | 24.38         | 39.23  | 46,500           | 15,151  |
| Río Loco               | 24.73              | 64.05              | 21.63         | 34.81  | 46,500           | 15,151  |
| Río Guanajibo          | 127.21             | 329.47             | 23.78         | 38.27  | 136,860          | 44,593  |
| Río Grande de Añasco   | 180.82             | 468.32             | 34.75         | 55.93  | 311,490          | 101,492 |
| Río Culebrinas         | 103.32             | 267.5988           | 37.33         | 60.07  | 291,010          | 94,819  |



2020 RELEASE UNDER E.O. 14176





Ilustración 3.6 Mapa de Embalses



Fuente: Departamento de Recursos Naturales y Ambientales, 2003

Tabla 3.3 Características principales de los embalses de Puerto Rico

| Características                                                       | Caonillas             | Carite           | Cerrillos                       | Cidra            | Coamo        | Dos Bocas             | El Guineo            | Fajardo     | Garzas                | Guajataca                             | Guayabal              | Guayo                  | La Plata                      | Loco                   | Carraízo                       | Lucchetti              | Matrullas            | Patillas               | Prieto               | Toa Vaca          | Yahuecas             |
|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------|------------------|---------------------------------|------------------|--------------|-----------------------|----------------------|-------------|-----------------------|---------------------------------------|-----------------------|------------------------|-------------------------------|------------------------|--------------------------------|------------------------|----------------------|------------------------|----------------------|-------------------|----------------------|
| Cuenca hidrográfica                                                   | Río Grande de Arecibo | Río de La Plata  | Río Bucaná                      | Río Bayamón      | Río Coamo    | Río Grande de Arecibo | Río Grande de Manatí | Río Fajardo | Río Grande de Arecibo | Río Guajataca                         | Río Jacaguas          | Río Grande de Añasco   | Río de La Plata               | Río Loco               | Río Grande de Loíza            | Río Yauco              | Río Grande de Manatí | Río Grande de Patillas | Río Grande de Añasco | Río Jacaguas      | Río Grande de Añasco |
| Municipio en que está ubicado                                         | Utado                 | Guayama          | Ponce                           | Cidra            | Santa Isabel | Arecibo y Utado       | Ciales y Orocovis    | Fajardo     | Adjuntas              | Isabela, Quebradillas y San Sebastián | Juana Díaz y Villalba | Adjuntas y Lares       | Bayamón, Naranjito y Toa Alta | Yauco                  | Caguas, Gurabo y Trujillo Alto | Yauco                  | Orocovis             | Patillas               | Lares y Maricao      | Villalba          | Adjuntas             |
| Año en que se construyó                                               | 1948                  | 1913             | 1991                            | 1946             | 1914         | 1942                  | 1931                 | 2004        | 1943                  | 1928                                  | 1913                  | 1956                   | 1974                          | 1951                   | 1953                           | 1952                   | 1934                 | 1914                   | 1955                 | 1972              | 1956                 |
| Dueño                                                                 | AEE                   | AEE              | DRNA                            | AAA              | AEE          | AEE                   | AEE                  | AAA         | AEE                   | AEE                                   | AEE                   | AEE                    | AAA                           | AEE                    | AAA                            | AEE                    | AEE                  | AEE                    | AEE                  | AAA               | AEE                  |
| Usos principales                                                      | Energía, Abasto       | Abasto Riego     | Control de inundaciones, Abasto | Abasto           | Riego        | Energía, Abasto       | Energía              | Abasto      | Energía               | Riego, Abasto                         | Riego                 | Riego, Energía, Abasto | AAA                           | Riego, Energía, Abasto | Abasto                         | Riego, Energía, Abasto | Energía              | Riego, Abasto          | Energía              | Abasto, Riego     | Energía              |
| Tipo represa                                                          | H                     | T                | E <sup>a</sup>                  | H                | H            | H                     | E <sup>a</sup>       | T           | T                     | T                                     | C <sup>d</sup>        | H                      | H                             | H                      | H                              | H                      | T                    | T                      | H                    | T                 | H                    |
| Área captación (mi²)                                                  | 48.3                  | 8.3              | 17.4                            | 8.1              | 66           | 175                   | 1.65                 | 0.248       | 6.1                   | 35.2                                  | 21.1                  | 9.7                    | 180.5                         | 8.40                   | 207.7                          | 17.4                   | 4.42                 | 25.7                   | 9.5                  | 22.2              | 17.4                 |
| Elevación tope del vertedor, en pies sobre el nivel del mar           | 826                   | 1,784            | 611                             | 1,322            | 160          | 295                   | 2,960                | 179         | 2,415                 | 664                                   | 331                   | 1,460                  | 155                           | 230                    | 135                            | 570                    | 2,455                | 191                    | 1,485                | 541               | 1,471                |
| Largo total de la represa en pies                                     | 815                   | 500              | 1,560                           | 541              | *            | 1,320                 | 565                  | 1,040       | 910                   | 1,040                                 | 1,980                 | 555                    | 774                           | 600                    | 689                            | 571                    | 710                  | 1,070                  | 247                  | 1,740             | 450                  |
| Altura de la represa en pies                                          | 235                   | 104              | 323                             | 105              | 65           | 188                   | 125                  | 115         | 202                   | 123                                   | 130                   | 190                    | 131                           | 72                     | 98                             | 178                    | 120                  | 147                    | 98                   | 215               | 90                   |
| Área superficial del embalse en millas cuadradas (mi²)                | 1.04                  | 0.46             | 0.82                            | 0.41             | *            | 0.99                  | 0.07                 | 0.117       | 0.15                  | 1.32                                  | 0.56                  | 0.45                   | 1.16                          | 0.11                   | 1.03                           | 0.42                   | 0.12                 | 0.58                   | 0.02                 | 1.24              | 0.08                 |
| Profundidad máxima en pies                                            | 131                   | 66               | 290                             | 61               | *            | 74                    | 72                   | 176         | 98                    | 89                                    | 43                    | 126                    | 89                            | 30                     | 59                             | 84                     | 71                   | 79                     | 32                   | 177               | 21                   |
| Profundidad promedio en pies                                          | 51                    | 29               | 91                              | 18               | *            | 23                    | 33                   | 164         | 42                    | 41                                    | 14                    | 47                     | 35                            | 9.8                    | 17                             | 36                     | 33                   | 31                     | 12                   | 65                | 5.4                  |
| Capacidad original en acres-pies                                      | 45,100                | 11,300           | 47,900                          | 5,300            | 2,830        | 30,400                | 1,860                | 4,455       | 4,700                 | 39,300                                | 9,580                 | 15,565                 | 32,600                        | 1,950                  | 21,700                         | 16,500                 | 3,010                | 14,300 <sup>f</sup>    | 621                  | 55,900            | 1,430                |
| Capacidad según estudio más reciente en acres-pies y fecha (mes, año) | 34,300 (feb 2000)     | 8,710 (oct 1999) | ND                              | 4,670 (nov 1997) | 115 (1968)   | 14,600 (oct 1999)     | 1,530 (oct 2001)     | NA          | 4,140 (sep 1996)      | 34,300 (ene 1999)                     | 4,960 (dic 2001)      | 13,400 (oct 1997)      | 28,700 (oct 1998)             | 705.3 (mar 2000)       | 14,212 (ene 2004)              | 9,630 (mar 2000)       | 2,500 (dic 2001)     | 11,200 (abr 1997)      | 180.8 (oct 1997)     | 52,000 (jul 2002) | 267.5 (mar 1997)     |
| Capacidad estimada para el año 2004 en acres-pies                     | 33,400                | 8,560            | 47,300                          | 4,580            | *            | 13,200                | 1,520                | 4,455       | 4,060                 | 33,900                                | 4,800                 | 13,100                 | 27,800                        | 604                    | 14,700                         | 9,060                  | 2,480                | 10,600 <sup>f</sup>    | 107                  | 51,700            | 69.6                 |
| Capacidad restante para el año 2004 por ciento (%)                    | 74                    | 76               | 99                              | 86               | *            | 44                    | 82                   | 100         | 86                    | 86                                    | 49                    | 84                     | 85                            | 31                     | 68                             | 55                     | 82                   | 76 <sup>f</sup>        | 17                   | 93                | 4.9                  |



PLAN INTEGRAL DE RECURSOS DE AGUA  
ABRIL, 2008

| Características                                           | Caonillas    | Carite       | Cerrillos   | Cidra     | Coamo | Dos Bocas     | El Guineo | Fajardo              | Garzas       | Guajataka   | Guayabal           | Guayo     | La Plata  | Loco      | Carraízo  | Lucchetti | Matrullas | Patillas           | Prieto | Toa Vaca  | Yahuecas |
|-----------------------------------------------------------|--------------|--------------|-------------|-----------|-------|---------------|-----------|----------------------|--------------|-------------|--------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------------|--------|-----------|----------|
| Tasa de sedimentación promedio en acres-pies/año          | 209          | 30           | 49          | 12.4      | *     | 277           | 4.7       | NA                   | 10.6         | 70.6        | 49.5 <sup>e</sup>  | 52.0      | 161       | 25.3      | 245       | 143       | 7.6       | 89.2 <sup>f</sup>  | 10.5   | 131       | 28.3     |
| Tasa de sedimentación promedio en acres-pies/mi²/año      | 2.44         | 3.66         | 2.82        | 1.50      | *     | 1.63          | 2.85      | NA                   | 1.75         | 2.29        | 2.35 <sup>e</sup>  | 1.93      | 0.89      | 3.00      | 1.18      | 8.27      | 1.72      | 3.54 <sup>f</sup>  | 1.09   | 5.99      | 1.63     |
| Tasa de sedimentación en toneladas/mi²/año                | 3,280        | 5,020        | N.D.        | 1,990     | *     | 3,570         | 4,200     | NA                   | 1,460        | 3,080       | 3,200 <sup>e</sup> | 2,220     | 1,250     | 3,890     | 750       | 3,250     | 2,680     | 4,810 <sup>f</sup> | 2,330  | 7,670     | 1,960    |
| Vida útil remanente en años                               | 160          | 285          | 958         | 370       | *     | 48            | 328       | > 2,000 <sub>b</sub> | 385          | 481         | 97                 | 269       | 171       | 24        | 60        | 62        | 324       | 126 <sup>f</sup>   | 10     | 394       | 3        |
| Rendimiento Seguro en mgd                                 | 42.0         | 11.6         | 14.3        | 4.7       | *     | 54.0          | 2.8       | 12.0                 | 7.0          | 41.2        | 7.3                | 11.9      | 50.2      | 1.9       | 63.3      | 11.7      | 2.7       | 22.7               | 4.2    | 13.5      | 4.8      |
| Caudal anual promedio de entrada en acres-pies/año        | 201,100      | 31,500       | 41,500      | 11,800    | *     | 325,000       | 3,870     | 13,500 <sup>c</sup>  | 13,500       | 84,700      | 19,600             | 16,001    | 235,700   | 9,340     | 336,500   | 25,413    | 21,200    | 50,200             | 18,400 | 17,500    | 37,700   |
| Tasa promedio anual en que el agua del embalse se renueva | 6.0          | 3.7          | 0.88        | 2.6       | *     | 25            | 2.5       | 3.3                  | 3.3          | 2.5         | 4.0                | 4.5       | 8.5       | 18        | 23        | 3.1       | 8.5       | 4.6                | 172    | 0.34      | 541      |
| Estado trófico (datos no publicados del USGS)             | Meso trófico | Meso trófico | Mesotrófico | Eutrófico | *     | Hiper-trófico | ND        | NA                   | Meso trófico | Mesotrófico | Hipertrófico       | Eutrófico | Eutrófico | Eutrófico | Eutrófico | Eutrófico | Eutrófico | Eutrófico          | ND     | Eutrófico | ND       |

- ARepresa hecha con piedras u hormigón armado.
- BSe estima que el embalse tardará 2,100 años en perder la mitad de su capacidad de almacenaje.
- CBasado en la suposición de que el caudal anual promedio de entrada será igual al rendimiento seguro de 12 millones de galones por día y que el cambio en volumen del embalse interanual será cero.
- DRepresa en hormigón armado reforzado con estribos en forma de pilastras.
- ELas tasas de sedimentación fueron calculadas considerando las condiciones recientes del embalse luego de la construcción del Embalse Toa Vaca en 1972 . La construcción del Embalse Toa Vaca redujo el área de captación del Embalse Guayabal de 43.2 mi² a 21 mi².
- FDatos de capacidad original no disponibles. Capacidad según calculada en 1961 (Luis R. Soler, 1999, Sediment Survey of Embalse Patillas, Puerto Rico, April 1997: USGS). Los cálculos se realizaron a base de 36 años de datos presentados en el estudio citado.
- NA  
ND  
USGS  
mi²  
Mgd  
acre-pie  
\*No aplica  
No determinado  
U.S. Geological Survey  
millas cuadradas  
Millones de galones por día  
43,560 pies cúbicos = 325,851 galones  
Sedimentado, en proceso de restauración

[C = contrafuerte, E = escollera, H = hormigón, T = tierra]

### 3.3.2 Agua subterránea

Un acuífero es una formación geológica saturada con agua, cuyo volumen y permeabilidad es suficiente para sostener la extracción de un caudal significativo de agua dulce (Driscoll, 1986; Campbell y Lehr, 1973). Puerto Rico cuenta con una diversidad de formaciones geológicas que funcionan como acuíferos, las cuales se pueden agrupar en tres tipos de formaciones geológicas fundamentales: depósitos aluviales, roca caliza (cárstica) y roca ígnea. La clasificación y la localización de los diferentes acuíferos en la Isla se presentan en la Ilustración 3.7.

La productividad de los acuíferos es función de los materiales que los forman y de las fuentes de recarga. No todas las formaciones saturadas pueden producir agua en cantidades significativas. Las arcillas, por ejemplo, no funcionan como acuíferos aún cuando están saturadas con agua



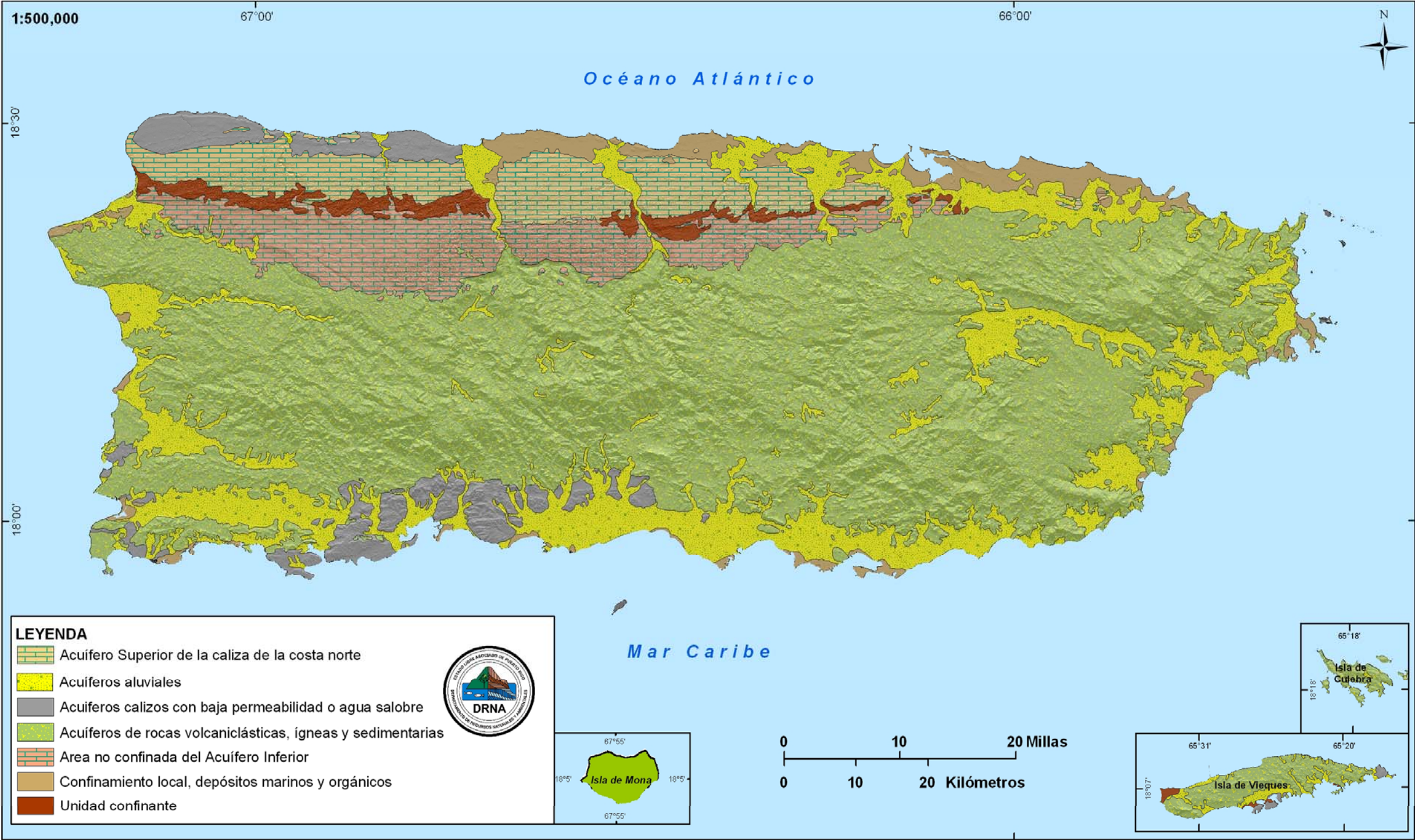
porque su permeabilidad es extremadamente baja. El agua en los acuíferos fluye lentamente desde las áreas de recarga hacia las áreas de descarga, un viaje que puede durar décadas. En consecuencia, los acuíferos se caracterizan por un volumen de almacenaje relativamente grande en comparación a su tasa de recarga.

#### 3.3.2.1 Acuíferos de la Costa Norte

Los Acuíferos de la Costa Norte se extienden desde Luquillo hasta Aguadilla, ocupando un área de aproximadamente 905 mi<sup>2</sup> y consisten de roca caliza (carso) y de formaciones aluviales en los valles de los ríos (véase Ilustración 3.8).



Ilustración 3.7 Mapa de Acuíferos de Puerto Rico





1:450,000



Océano Atlántico

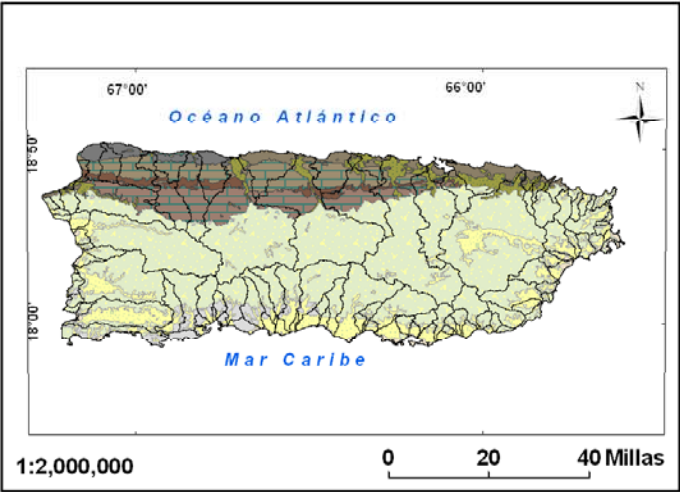
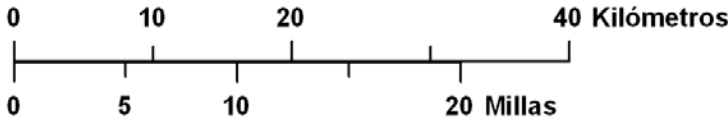
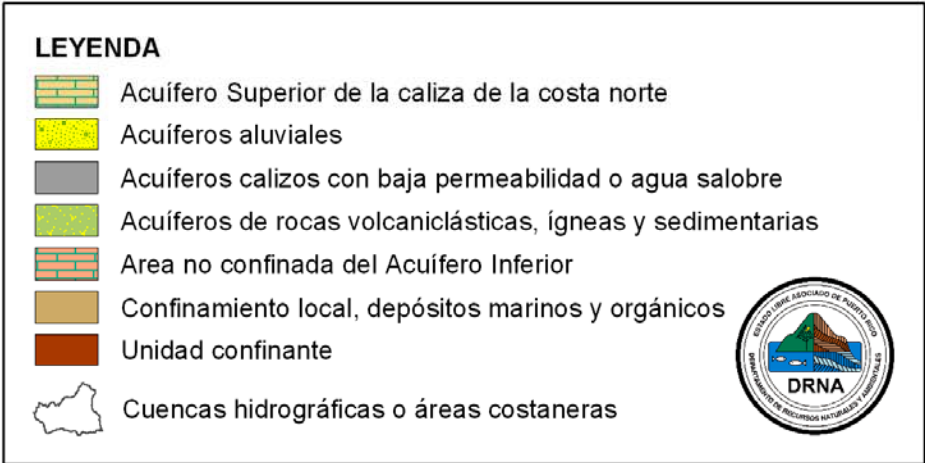
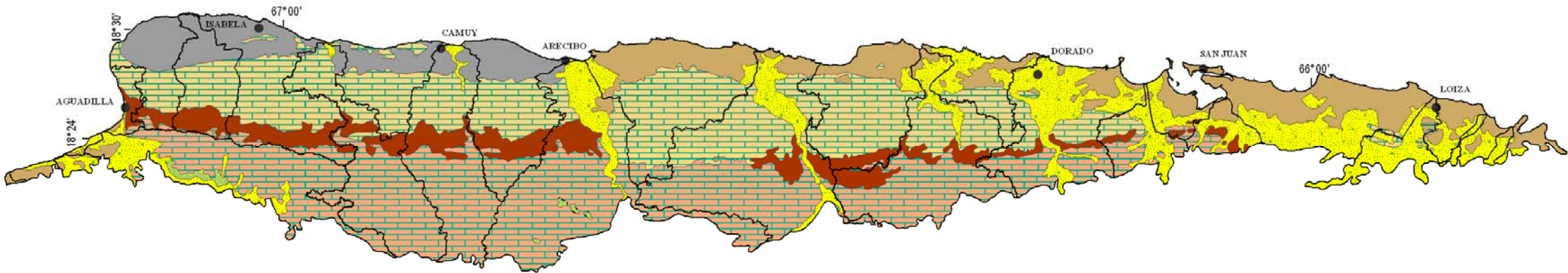
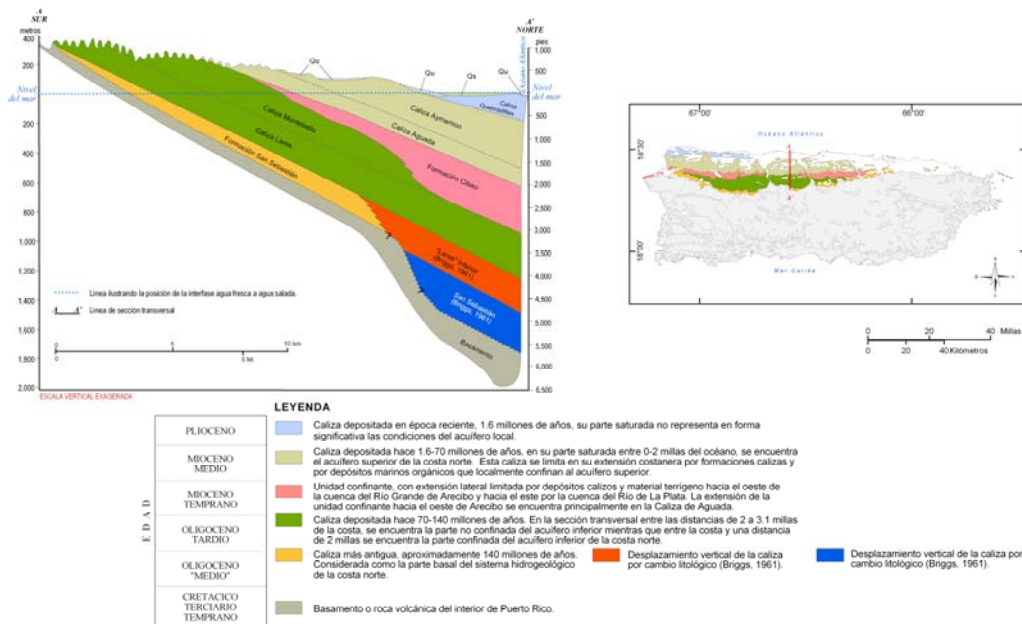


Ilustración 3.8 Acuífero del Norte



Los acuíferos más importantes de Puerto Rico son los de la caliza del Norte con una permeabilidad secundaria creada por la disolución de la roca por acción del agua. Esta formación se encuentra principalmente hacia el Oeste de San Juan con un desarrollo mayor en el área desde Dorado hasta Arecibo.

La Región del Carso de la Costa Norte es un acuífero complejo en su estructura y funcionamiento. Su estructura general consiste de dos acuíferos de roca caliza, uno por encima del otro, separados por una formación de menor permeabilidad: la caliza formación Cibao. Los dos acuíferos son denominados el Acuífero Superior y el Acuífero Inferior, también conocidos como Acuífero Llano o Freático (Superior) y el Acuífero Profundo o Artesiano (Inferior). La Ilustración 3.9 presenta un corte transversal en el área del Caño Tiburones mostrando la configuración básica de las formaciones que constituyen los acuíferos.



**Ilustración 3.9 Sección transversal generalizada de los acuíferos de la Costa de Norte de Puerto Rico.**  
**Fuente: DRNA, 2004, modificado de USGS, 2002**

El Acuífero Superior consiste de rocas calizas con niveles altos a moderados de permeabilidad más un sistema aluvial, formado por el depósito de sedimentos en los

valles de los ríos que atraviesan la caliza. Este acuífero incluye capas de aluvión y depósitos marinos sobrepuestos a las formaciones calizas, primordialmente las denominadas Aymamón, Cibao, Camuy y Aguada (Monroe, 1980). El mismo se extiende desde la zona de Luquillo hacia el oeste. Su espesor máximo varía dependiendo de su ubicación de este a oeste, así como en los depósitos aluviales formados en los valles inmediatos a los ríos de la región. La permeabilidad en la roca caliza se desarrolla debido a canales de disolución. El Acuífero Superior es fuente importante de abastos de agua para consumo, usos industriales y actividades agrícolas, con una extracción de 52 mgd durante el año 2002 (DRNA, 2004). El límite inferior de este acuífero es la roca poco permeable de la formación Cibao.

El Acuífero Inferior (Profundo o Artesiano) incluye capas de las formaciones San Sebastián, Lares y Montebello, confinadas por estratos de barros y cienos de la Formación Cibao. El acuífero se extiende desde la Zona Metropolitana de San Juan hasta Aguadilla, aunque las zonas con mayor capacidad de producción de agua se encuentran entre Manatí y Arecibo. En esta zona se manifiestan condiciones artesianas donde, previo al desarrollo del acuífero, el nivel potenciométrico del agua permitía que los pozos en la zona fluyeran sin la necesidad de bombeo. Sin embargo, la explotación de éste ha ocasionado una reducción dramática del nivel potenciométrico en este acuífero. El Acuífero Inferior es la fuente principal de agua en usos industriales en la zona de Manatí a Barceloneta, además de suplir abastos moderados para consumo. Las extracciones de agua en este acuífero fueron de 7 mgd durante el año 2002 (DRNA, 2004).

Los acuíferos de caliza reciben recarga mediante la percolación de lluvia a través del suelo, por la descarga de escorrentía superficial hacia los sumideros y mediante infiltración por el fondo de los ríos. Además, pueden recibir recarga por la descarga de pozos sépticos y las filtraciones de tuberías rotas. Ambos acuíferos descargan hacia el fondo del mar, aunque el Acuífero Superior también descarga hacia manantiales, el fondo de los ríos y a humedales y lagunas costeras incluyendo el

Caño Tiburones y la Laguna Tortuguero. Los pozos también representan puntos de descarga para ambos acuíferos.

### **3.3.2.2 Acuíferos aluviales**

Los acuíferos aluviales se encuentran en las planicies inundables, principalmente en la Costa Sur y en algunos valles interiores como Caguas y Cayey. También existen acuíferos aluviales en la Costa Norte, en conjunto con las calizas, según descrita anteriormente. Estos acuíferos ocupan formaciones no-consolidadas de arenas y gravas permeables depositadas por los ríos antiguos, formaciones que ahora se encuentran por debajo de la superficie del terreno. Las áreas de mayor permeabilidad corresponden a las zonas de arenas y gravas depositadas en los cauces ancestrales. Los acuíferos más importantes de esta clase se encuentran en la Costa Sur (véase Ilustración 3.10). Los acuíferos aluviales son menos productivos en la Costa Norte debido a que en esta zona hay mucha más arcilla en los sedimentos aluviales, lo cual produce formaciones de poca permeabilidad. Los acuíferos aluviales descargan sus aguas por el fondo del mar, los fondos de los ríos y zonas de humedales.

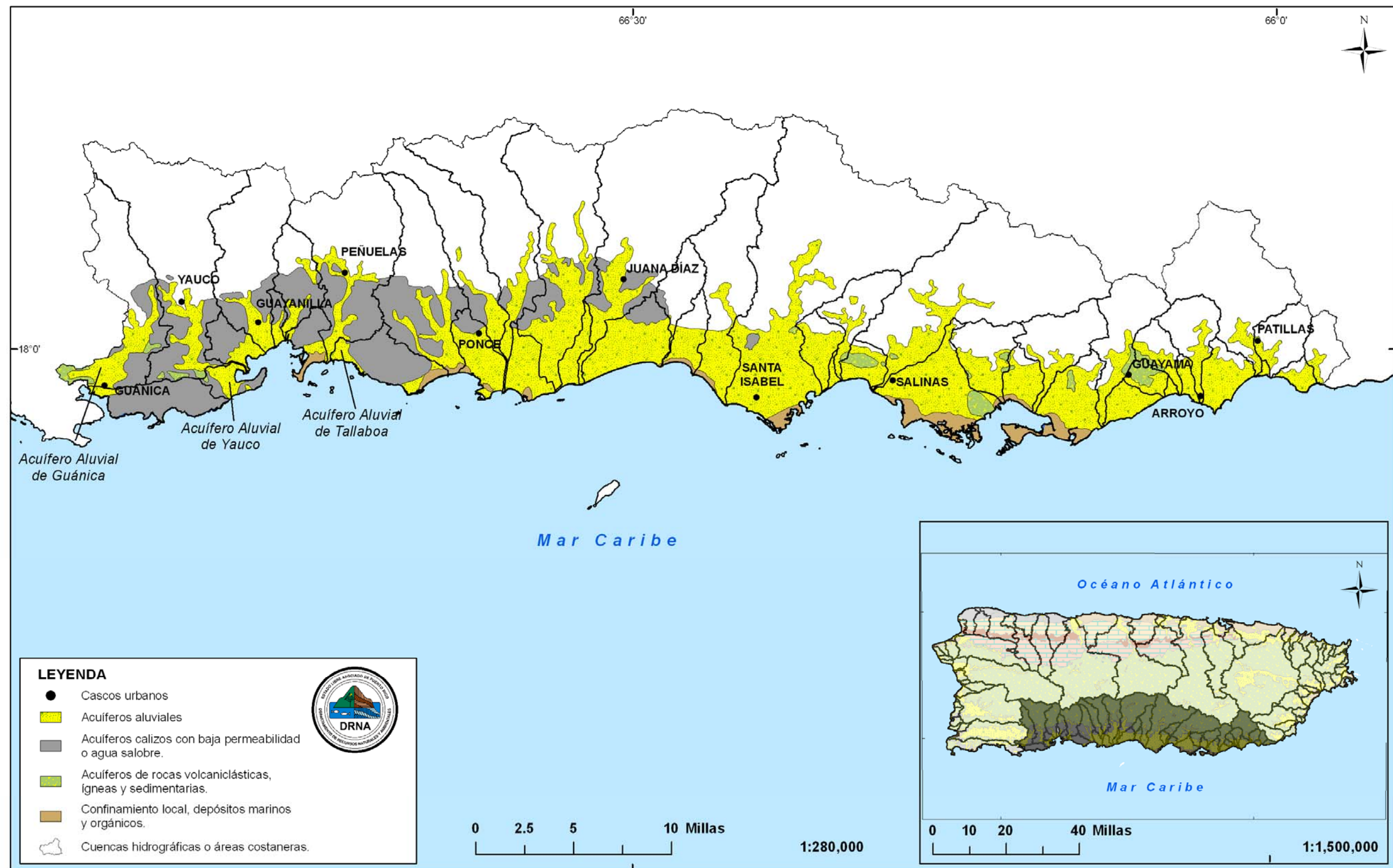
Las fuentes de recarga de los acuíferos aluviales incluyen:

- La percolación de lluvia por el suelo.
- Infiltración por los fondos de los ríos.
- Infiltración producto de intervenciones humanas mediante percolación por canales en tierra y la aplicación de riego.
- Filtraciones de tuberías rotas y el drenaje de pozos sépticos.

En la Costa Sur los ríos pierden flujo una vez salen de la zona de la montaña, recargando el acuífero y en algunos casos reduciendo su flujo superficial hasta cero durante el estiaje. Sin embargo, según el río se acerca a la costa, el flujo puede iniciarse nuevamente debido a la descarga del acuífero hacia el fondo del río.



Ilustración 3.10 Acuíferos de la Región Sur o Provincia del Sur de Puerto Rico



Fuente: Modificado del Servicio Geológico Federal, 2000

Los acuíferos de la Región Sur son una fuente importante de agua para consumo humano y actividades agrícolas, produciendo aproximadamente el 31 por ciento de toda el agua que se utiliza en la zona. La fuente principal de agua potable en los municipios de Salinas, Santa Isabel, Coamo y Guánica son los acuíferos aluviales. Los acuíferos en la Costa Sur proveyeron 50 mgd de los cuales la AAA extrajo 25 mgd, las fincas agrícolas 23 mgd y las industrias 2 mgd (USGS, 2002).

Históricamente una de las fuentes de recarga más importantes para los acuíferos de la Región Sur ha sido la infiltración de agua de riego suplido por los embalses Patillas, Carite y Guayabal; por los fondos de los canales de transmisión en tierra; y por la práctica de riego por surcos. La



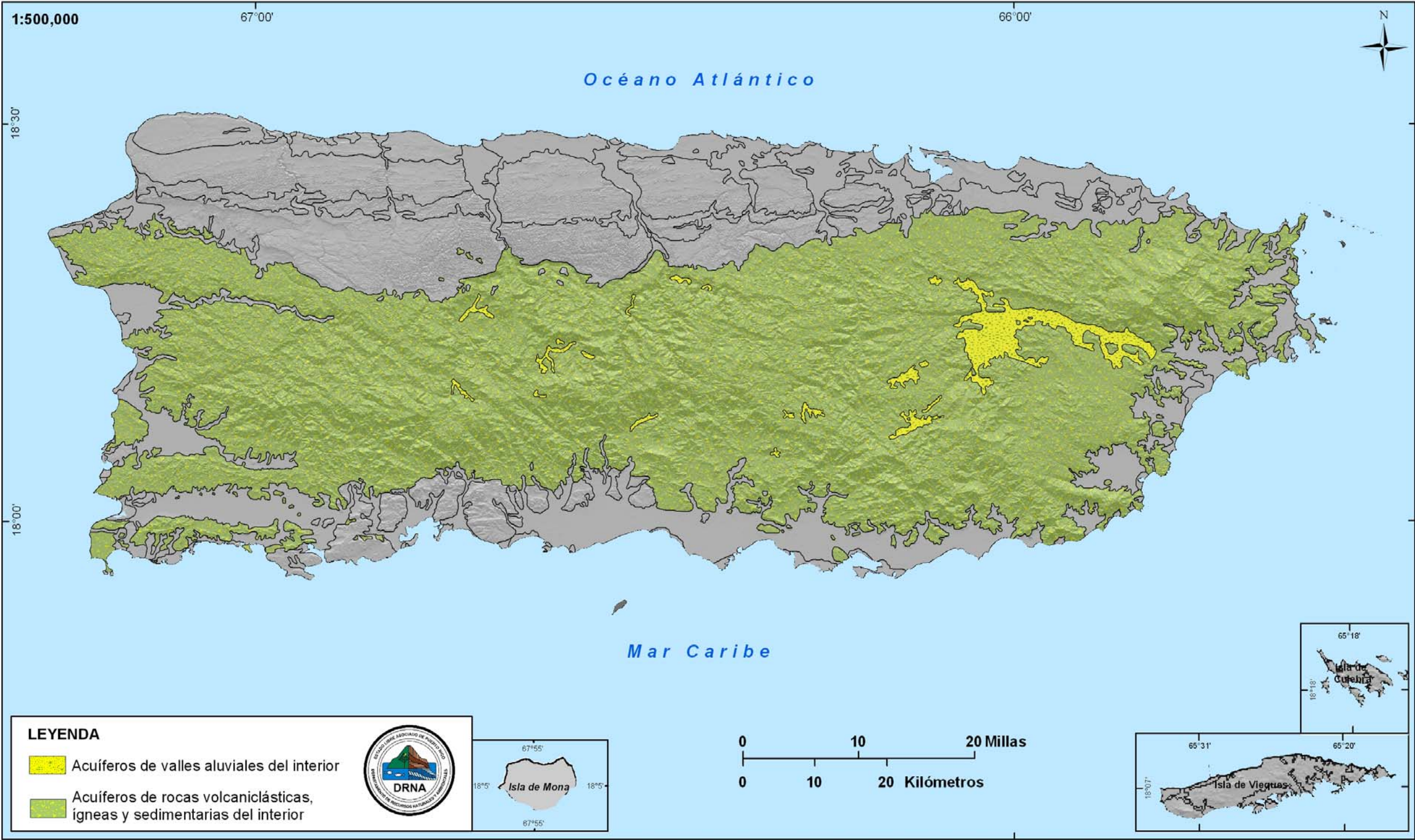
reducción en el área bajo riego, el incremento en la utilización del agua de los embalses para uso domésticos y la utilización de sistemas de riego de mayor eficiencia son factores que han producido una merma significativa en la recarga de los acuíferos en la Costa Sur durante los últimos 30 años.

### **3.3.2.3 Acuíferos de los valles interiores**

Los acuíferos en los valles interiores (véase Ilustración 3.11) generalmente consisten de depósitos aluviales o de roca fracturada con interconexión hidráulica con el aluvión. En algunos lugares se encuentran formaciones de caliza. Los acuíferos de mayor caudal en esta categoría son los de depósitos de aluvión en los valles de Caguas, Juncos y Cayey. Aunque algunos pozos en estas formaciones pueden tener capacidades de cientos de galones por minuto, típicamente el ritmo de extracción es mucho menor.



Ilustración 3.11 Acuíferos de la Región Montañosa en la Provincia del Interior Volcánica de Puerto Rico



El ritmo de extracción de estos acuíferos está limitado por la cantidad de recarga de la lluvia, la recarga de los ríos y la capacidad de almacenaje dentro del acuífero. Estos acuíferos no tienen conexión hidráulica con el mar, por lo que no están sujetos a problemas de intrusión de agua salina. Sin embargo, la presencia de hierro y manganeso ocasiona problemas de calidad en algunas áreas. Estos metales no representan un riesgo a la salud y pueden ser removidos fácilmente mediante oxidación.

Los acuíferos de los valles interiores generalmente tienen poca extensión y poco almacenaje. Por esta razón, es común que los pozos en esta región experimenten reducciones en sus caudales durante períodos de sequía y los niveles freáticos pueden variar sustancialmente debido a diferencias en el ritmo de recarga y descarga. El manejo de estos acuíferos depende del balance entre la extracción y la recarga, y el impacto de una reducción en el nivel del acuífero en reducir el flujo mínimo en los ríos que cruzan los valles y tienen conexión hidráulica con el acuífero.

### **3.3.2 Estuarios**

Los estuarios son zonas donde el agua dulce se mezcla con el agua del mar. Debido a que las mareas, el oleaje y las escorrentías varían en tiempo y espacio, el estuario es un sistema muy dinámico en lo que respecta a la salinidad de sus aguas y puede experimentar cambios dramáticos en ésta de una



localización a otra, al igual que pueden fluctuar en el tiempo. En Puerto Rico hay cinco clases de estuarios. El primero es el que forman en la zona de las desembocaduras de los ríos. Como el agua dulce es menos densa que el agua salada de mar, estos estuarios tienden a estar estratificados, lo que significa que



tienen una capa de agua dulce flotando sobre el agua de mar. En los ríos, el agua salada que entra tierra adentro se conoce como cuña de mar, por entrar por debajo de la capa de agua dulce. Los estuarios de la desembocadura de los ríos pueden estar separados del mar por una berma de arena excepto durante periodos cortos en que las crecidas remueven la berma en la boca. Esta berma se restablece por la acción del oleaje de la playa. El patrón de mezcla en esta clase de estuario se presenta en la Ilustración 3.12 la cual muestra la condición normal de estratificación vertical con agua salina en el fondo y una capa de agua dulce fluyendo por encima. En los ríos principales costeros la cuña de agua salina se puede extender hasta varias millas tierra adentro, ejemplos incluyen el Guajataca, Grande de Arecibo, Grande de Manatí, La Plata, Grande de Loíza y Espíritu Santo. Cuando hay poco flujo de agua dulce, por ejemplo aguas abajo de embalses, la circulación en esta clase de estuario puede quedar esencialmente paralizada, el agua salina queda atrapada en el fondo con muy poco insumo de oxígeno lo que puede crear condiciones anaeróbicas en el fondo del estuario por periodos prolongados. Lluvias intensas, provocan un aumento en el flujo de agua fresca en los ríos que a su vez elimina la cuña de agua salobre. Cuando merma el caudal de agua dulce, la cuña de agua de mar penetra nuevamente. El agua dulce se va mezclando con el agua de mar, formando aguas de salinidad intermedia. Esta mezcla se produce por la acción combinada de la marea, las olas y la fuerza de las escorrentías.

Otra característica de los estuarios de los ríos es la presencia de mangles, los cuales crecen en las áreas donde hay suficiente salinidad (aprox. 5,000 mg/l) como para impedir el crecimiento de plantas de agua dulce. Los mangles toleran un rango amplio de salinidad y también crecen donde no hay insumos de agua dulce, como son los cayos y costas secas. Los manglares de mayor productividad son aquellos que reciben insumos de nutrientes y agua dulce de los ríos.



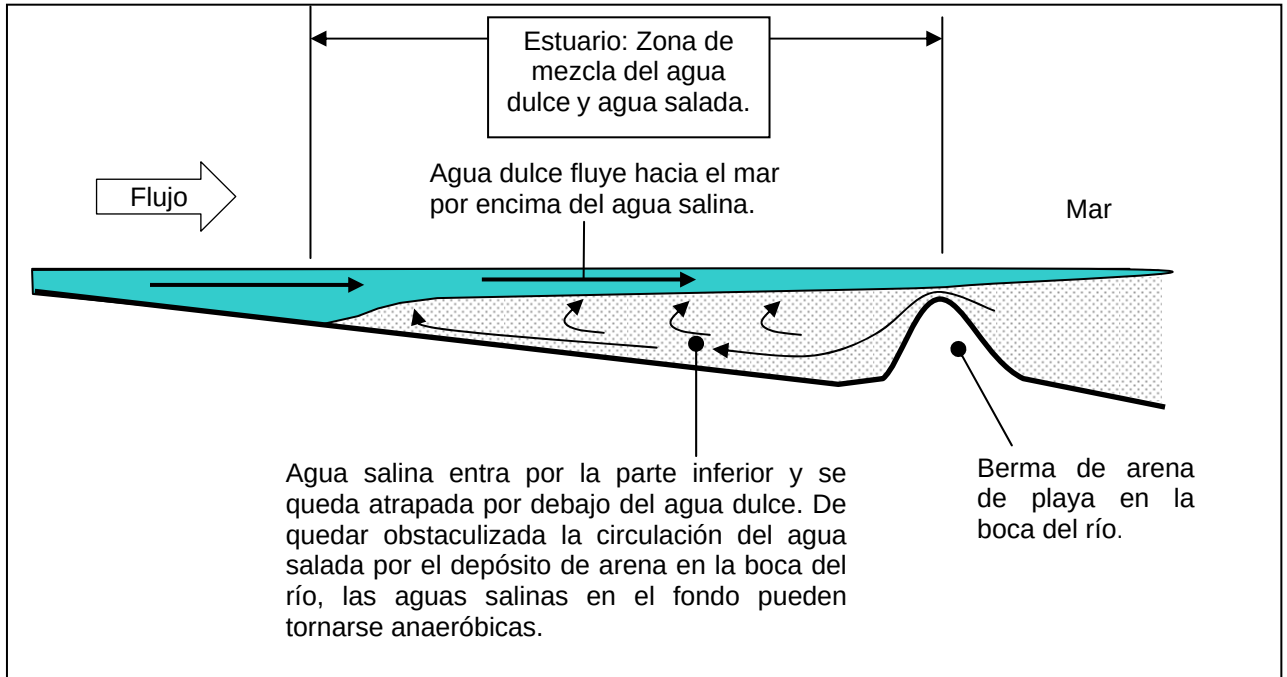


Ilustración 3.12 Diagrama de estuario con berma

La segunda clase de estuario son aquellos asociados con sistemas de lagunas costeras con conexión directa al mar. Ejemplo de éstos son las lagunas en el área de San Juan (San José, Piñones, Torrecilla) y el Caño Tiburones, cuya boca ha sido cerrada artificialmente, pero mantiene su conexión a través de la caliza permeable y manantiales de agua de mar. El agua dulce en las lagunas en el área de San Juan tiene su origen principalmente en la escorrentía superficial, mientras el Caño Tiburones se nutre principalmente de aguas subterráneas que brotan en esta zona.



El tercer tipo de estuario es el que forman los ríos que desembocan en bahías abiertas como la de Mayagüez y Arecibo. Estos estuarios son sistemas muy abiertos con poca extensión y predomina la acción y salinidad del mar. El cuarto tipo se forma cuando los cuerpos de agua dulce desembocan en bahías semi-cerradas como lo es la Bahía de San Juan, Guánica y Guayanilla, las cuales son de mayor extensión. En ambos tipos de estuarios, el intercambio entre el agua dulce y la salada es libre y directo.

El quinto tipo de estuario es el salino el cual se forma cuando los cuerpos de agua dulce son intermitentes.

En regiones secas, la salinidad del estuario puede ser más alta que la del mar, ya que cuando el agua de mar se evapora, la salinidad aumenta. A este tipo de estuario se le conoce como estuario negativo, porque en vez de diluir la salinidad del mar, la aumenta. La bahía de Ceiba y la bahía Fosforescente de La Parquera son ejemplos de estuarios en Puerto Rico cuya salinidad es levemente superior a la del mar (Lugo y García Martínó, 1996).

El estuario es el último ecosistema en utilizar el agua dulce antes de que ésta se diluya completamente en el mar. Los estuarios son lugares de desove, y donde se desarrolla la etapa juvenil de especies marinas y especies acuáticas de la montaña, como los camarones de río. Al estuario migran especies de la montaña y el mar: peces, aves, moluscos, crustáceos, anfibios y reptiles. Por ejemplo, el pez olivo que se encuentra en las montañas de Lares y Utuado, en su etapa larval (cetí) emigra desde Arecibo por el Río Tanamá hasta llegar allí. Los camarones también migran varios kilómetros desde la montaña al estuario y luego regresan a la montaña para alimentarse y desarrollarse. La migración de estos camarones ocurre con mayor frecuencia durante la noche (Lugo y García Martínó, 1996). En los estuarios se pueden encontrar especies endémicas y otras que sólo vienen a desovar o a pasar una parte de su ciclo de vida (Ej. cetí, camarones, sábalo, jarea y otros). Para estos organismos cualquier impedimento que obstruya su acceso al estuario implica una alteración a su ciclo de vida, imposibilitando así la reproducción de generaciones futuras.

Los estuarios poseen tres tipos de productores que realizan el proceso de fotosíntesis: macrofitos (algas, hierbas marinas e hierbas de pantanos), microfitos bénticos (algas y otros tipos de plantas unidas al fondo) y fitoplancton (algas microscópicas flotantes). Las comunidades de plantas asociadas al lugar como



bosques pantanosos (*Pterocarpus* o "palo de pollo"), pantanos, manglares y plantas flotantes también contribuyen a la cadena alimentaría del estuario.

Los estuarios son importantes para mantener la alta calidad de las aguas costaneras, acomodar las inundaciones, amortiguar las marejadas, y sostener la recreación y el turismo.

Algunas actividades antropogénicas que afectan negativamente a los estuarios son: descargas de efluentes domésticos e industriales, aguas calientes, derrames de petróleo y otros; la sedimentación excesiva; y estructuras para controlar el movimiento del agua dulce, tales como las presas, las tomas de agua superficial, bombas de drenaje y extracción de agua subterránea y otras que afectan el equilibrio del estuario.

## **3.4 Ecosistemas de agua dulce**

### **3.4.1 La fauna nativa y exótica**

Los ríos presentan una diversidad importante de fauna acuática. Existen siete especies de peces (familias Anguillidae, Mugilidae, Eleotridae y Gobiidae), trece especies de camarones de río (familias Palaemonidae y Atydae), una de cangrejo de agua dulce (Pseudotelphusidae) y varias especies de caracoles, principalmente de la familia Neritidae (véase Ilustración 3.13).

También hay peces y caracoles exóticos que han sido introducidos intencional o accidentalmente. Los peces exóticos se han dispersado desde los embalses donde han sido introducidos, mientras que los caracoles (*Thiara granifera* y *Marisa cornuarietis*) fueron introducidos como controles biológicos como parte del programa de erradicación de la bilharzia. Las poblaciones de esas especies exóticas de peces y caracoles ya están establecidas en la Isla (véase Tabla 3.4). Las especies introducidas accidentalmente incluyen: especies de las familias Characidae, Cyprinidae, Ictaluridae, Aplocheilidae, Poecillidae, Centrarchidae y Cichlidae.



Ilustración 3.13 Especies de peces y crustáceos de ríos de Puerto Rico

**Tabla 3.4 Lista de especies introducidos en Puerto Rico. Modificado de Lugo y colaboradores (2001). Nombres comunes tomados de DRNA (1986) y Erdman (1984, 1987)**

| FAMILIA / Nombre Científico  | Nombres Comunes                        | Fecha de introducción y procedencia |
|------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------------|
| CHARACIDAE                   |                                        |                                     |
| <i>Dorasoma petenense</i>    | Sardina de agua dulce, Threadfin Shad  | 1963 Georgia, U.S.A.                |
| CYPRINIDAE                   |                                        |                                     |
| <i>Carassius auratus</i>     | Goldfish                               | 1900? China                         |
| <i>Pimephales promelas</i>   | Fathead Minnow                         | 1957 Norteamérica                   |
| ICTALURIDAE                  |                                        |                                     |
| <i>Ameirus catus</i>         | Barbudo de canal, White Catfish        | 1938 Norteamérica                   |
| <i>Ameirus nebulosus</i>     | Brown Bullhead                         | 1916 Norteamérica                   |
| <i>Ictalurus marmoratus</i>  | Marbled Bullhead                       | 1946 Norteamérica                   |
| <i>Ictalurus punctatus</i>   | Liza, Channel Catfish                  | 1938 Norteamérica                   |
| POECILLIDAE                  |                                        |                                     |
| <i>Gambusia affinis</i>      | Mosquitofish                           | 1914 Norteamérica                   |
| <i>Poecilia reticulata</i>   | Guppy                                  | 1935? Suramérica                    |
| <i>Poecilia vivipara</i>     | Top Minnow                             |                                     |
| <i>Xiphophorus helleri</i>   | Swordtail                              | 1935 Mexico                         |
| <i>Xiphophorus maculatus</i> | Southern Platyfish                     | 1935 Mexico                         |
| <i>Xiphophorus variatus</i>  | Variable Platyfish                     |                                     |
| <i>Barbus conchinus</i>      | Minó rosado, Minnow                    |                                     |
| CENTRARCHIDAE                |                                        |                                     |
| <i>Lepomis auritus</i>       | Redbreast Sunfish                      | 1957 Norteamérica                   |
| <i>Lepomis gulosus</i>       | Warmouth Bass                          |                                     |
| <i>Lepomis macrochirus</i>   | Chopa de agalla azul, Bluegill Sunfish | 1916 Norteamérica                   |
| <i>Lepomis microlopus</i>    | Chopa caracolera, Redear Sunfish       | 1957 Norteamérica                   |
| <i>Micropterus coosae</i>    | Redeye Bass                            | 1958 Sureste de U.S.A.              |
| <i>Micropterus salmoides</i> | Lobina de boca grande, Largemouth Bass | 1946 Norteamérica                   |
| CICHLIDAE                    |                                        |                                     |
| <i>Astronotus ocellatus</i>  | Oscar                                  |                                     |
| <i>Cichla ocellaris</i>      | Tucunaré, Peacock Bass                 |                                     |
| <i>Tilapia aurea</i>         | Golden Tilapia                         |                                     |
| <i>Tilapia urolepis</i>      | Redeyed Tilapia                        |                                     |
| <i>Tilapia mossambica</i>    | Tilapia moteada, Tilapia               | 1958 Mozambique, Africa             |
| <i>Tilapia rendalli</i>      | BlueTilapia                            |                                     |
| <i>Cichlasoma managuense</i> | Jaguar gapote                          | Centroamérica                       |
| <i>Amphilofus labiatus</i>   | Red devil                              | Centroamérica                       |

Todas las especies nativas requieren migrar entre el agua dulce y el agua salina para completar su ciclo reproductivo, con la excepción del cangrejo buruquena y una especie de pez, la guavina. Entre los peces nativos sobresalen el dajao (*Agonostomus monticola*), el olivo (Sirajo, cetí o setí, *Sycidium plumieri*), la saga (*Awous tajasica*), la guavina (*Gobiomorus dormitor*), la anguila (*Anguilla rostrata*) y el morón (*Eleotris pisonis*). Estos peces ocupan zonas particulares a lo largo de los ríos y quebradas relacionada con su capacidad de natación y ciclo de vida (Nieves,

1998). Peces con gran capacidad nadadora como el dajao y el olivo pueden saltar o trepar pequeñas cascadas y encontrarse a más de 10 Km. (10 millas) aguas arriba desde la desembocadura de los ríos. La guavina, la anguila y la saga alcanzan distancias intermedias y usualmente su movimiento es confinado por barreras pequeñas. Finalmente, el morón, con menos capacidad de natación, se aleja poco de las aguas salobres por lo que se limita a los tramos de la planicie costera y la parte alta del estuario.

La mayor parte de las especies de camarones se encuentran distribuidas en los tramos no desarrollados de todos los ríos y quebradas alrededor de la Isla (Pérez, 1999), y se observan algunas diferencias en términos de preferencias de hábitat (Johnson y Covich, 2000). Sin embargo, al igual que en los peces, hay una disminución significativa en el número de especies río arriba debido a la presencia de barreras o la inclinación del río o quebrada debido a la poca capacidad de natación de algunas especies. La gata o guábaras (*Atya lanipes* y *A. innocuous*), el chiripi (*Xiphocaris elongata*) y los bocú, coyunteros o leopardos (*Macrobrachium* spp.) son las especies más abundantes en los ríos y quebradas. Éstas han sido reportadas a más de 24 Km. (15 millas) aguas arriba de la desembocadura de algunos ríos (Santiago, 1979). En lugares con elevación menor de 300m (900 pies), particularmente en los ríos y quebradas del Este de la Isla, es común encontrar al caracol burgao (Neritidae: *Neritina virginea*). En los bosques ribereños de las cuencas medias y altas también se encuentra el cangrejo terrestre o buruquena (*Epilobocera sinuatifrons*), que baja a los ríos y quebradas para alimentarse de insectos y pequeños camarones y caracoles.

Contrario a los estuarios, pocos ríos y quebradas están protegidos por agencias federales o estatales. Al presente, sólo las cuencas de los ríos que drenan desde el Yunque o la Sierra de Luquillo, están protegidos por el Bosque Nacional El Yunque que administra el Servicio Forestal Federal. La cuenca baja del Río Espíritu Santo



también se encuentra protegida por el DRNA. No obstante, la ubicación en el río Espíritu Santo de una presa baja y una toma de agua construida por la AAA, ha eliminado el flujo aguas abajo de la toma la mayor parte del tiempo debido a la cantidad de agua que se extrae. También representa una barrera migratoria. El efecto que esto ha tenido en la fauna acuática de este río se discute en Benstead, et al, 1999. Esto implica que la protección brindada a la parte baja de la cuenca no protege al estuario de las acciones que se hacen en la parte alta. En los bosques estatales de las montañas, tales como Río Abajo, Guilarte, Toro Negro, Carite, Susúa y Maricao, sólo se protegen los nacimientos de los ríos y la parte más alta de la cuenca.

### **3.4.2 Embalses o lagos artificiales**

Los 36 embalses construidos entre 1913 y 1972 se han transformado en ecosistemas o lagos artificiales que albergan comunidades de plantas y animales, lo que le añade valor ecológico y de recreación a éstos. Actualmente, el DRNA administra instalaciones para la pesca en los embalses Guajataca, La Plata y Lucchetti.



Además, a través de su Programa

de Pesca Recreativa maneja la pesca recreativa, realiza siembras de lobina y chopas producidas en el Vivero de Peces de Maricao, y hace encuestas a los pescadores recreativos. En Puerto Rico hay aproximadamente 60,000 personas que pescan en los embalses con fines recreativos. Casi todos los fines de semana, se realizan torneos de pesca de la lobina y el tucunaré.

La mayor parte de la fauna presente en los embalses ha sido introducida para suplementar la dieta de la población, además de proveer oportunidades de recreación para la gente a través de la pesca deportiva. La actividad de introducción de peces se inició entre los años 1915 y 1916 y continúa hasta hoy por el DRNA. Las familias de peces comúnmente introducidas son Centrarchidae, Cichlidae y Poecillidae con seis especies cada una. La tilapia (*T. mossambica*) es la especie más abundante en embalses tales como Carraízo, Patillas y Toa Vaca y también se encuentra en los ríos. La tilapia es una de las especies de mayor tolerancia a la contaminación y a la reducción resultante en los niveles de oxígeno en el agua.

En los embalses también se encuentran algunas especies nativas de peces y camarones. Las especies presentes, en su mayoría, son aquellas capaces de trepar por las represas bajas. Por lo tanto, especies que requieren del desarrollo larval en el mar para completar su ciclo de vida pueden encontrarse en bajas densidades en estos embalses y ausentes en los embalses con presas altas (Rivera, 1979). En el Río Matrullas, aguas arriba del embalse, aún se conservan poblaciones de camarones y peces migratorios a pesar de que la represa fue construida en el año 1934 (Ortiz-Carrasquillo, 1981). Debido a que la presa Matrullas es baja y siempre tiene agua vertiendo, los camarones pueden migrar hasta el mar y volver a subir aguas arriba de la presa. Un estudio reciente (Bacheler y colaboradores, 2004) sugiere que la población de la guavina (*Gobiomorus dormitor*) en el embalse de Carite (Río La Plata) se ha establecido con éxito, ya que los individuos alcanzan la madurez sexual, pueden reproducirse y sus larvas desarrollarse, sin necesidad de migrar hasta el mar. La ausencia de poblaciones aguas arriba y aguas abajo de este embalse apoyan esta hipótesis.

El manejo de los embalses tiene un efecto directo sobre la reproducción de las especies. Por ejemplo, la reproducción de la lobina depende de que haya un nivel

de agua estable en los embalses entre diciembre y marzo porque hacen sus nidos en aguas llanas.

### **3.4.3 Ciclos de vida**

Debido al aislamiento geográfico de Puerto Rico de los ríos continentales, las especies nativas de peces, camarones y caracoles tienen ancestros recientes marinos y aparentemente colonizaron los ríos costeros como un mecanismo evolutivo para escapar de la depredación (Vermeij, 1987) y aprovecharse de la disponibilidad de alimento (Gross y colaboradores, 1988). Por esta razón, estas especies de los ríos costeros aún requieren de las aguas marinas para completar sus ciclos de vida. Así, los individuos migran hasta los estuarios para reproducirse o para el desarrollo larval y posteriormente retornan al río para crecer.

Este ciclo de vida migratorio (diádromo) puede ser de dos tipos: catádromo o anfídromo (véase Ilustración 3.14). Las especies catádrovas habitan en los ríos en estado juvenil y adulto, pero los adultos regresan al mar para reproducirse y liberar los huevos. La etapa de vida larval también la pasan en el mar. Después de permanecer a la deriva de las corrientes marinas durante varios meses, las larvas regresan a los estuarios para migrar río arriba y convertirse en adultos. La anguila es catádrova (Nieves, 1998; Ching-Morales, 1982).

Las especies anfídrovas como el dajao, el olivo, la saga, la guavina y los camarones bocú (*Macrobrachium* spp.) también habitan en los ríos y quebradas, tanto en sus etapas juveniles como adultas. Sin embargo, los individuos migran aguas arriba lentamente a lo largo de toda su vida y cuando alcanzan la madurez sexual se reproducen en los ríos. Sus larvas son arrastradas por el caudal del río hasta el mar donde continúan su desarrollo. Después de varios meses, las postlarvas regresan a los estuarios y migran río arriba para convertirse en juveniles

y adultos. Los camarones gata (*Atya* spp.) y chiripi (*X. elongata*) y los caracoles burgao (*N. virginea*) son anfídromos (Nieves 1998, Blanco y Scatena, 2005). Otras especies de peces y camarones realizan migraciones locales entre las aguas marinas costeras y los estuarios para reproducirse o alimentarse.

Los cangrejos también migran entre los hábitats terrestres costeros y el mar para completar sus ciclos de vida. Por ejemplo, durante ciertas épocas del año las hembras migran hacia las playas para desovar en el mar. Varias semanas después, grandes grupos de individuos pequeños migran



nuevamente hacia la tierra. En los manglares sobresalen el juey (*Cardiosoma guanhumi*) y en las playas varias especies de las familias Ocypodidae (cangrejos fantasmas y violinistas) y Coenobitidae (cobitos). En la Isla de Mona aún son comunes estas migraciones denominadas “las cobadas”.

Estas migraciones a lo largo de los ríos y quebradas, las costas y los bosques ocurren durante épocas particulares del año y pueden denominarse como ritmos ecológicos. Por ejemplo, según pescadores, las mayores migraciones río arriba del cetí (postlarva del olivo *Sycidium plumieri*) ocurren uno o dos días después del cuarto creciente o de la luna llena entre septiembre y noviembre y duran dos días. También se cree que estas migraciones masivas ocurren después de las crecientes o golpes de agua (Erdman, 1986). Migraciones masivas de cetí de hasta 90 millones de individuos se han observado en el Río Grande de Añasco (Erdman, 1961); se estima que éstos pueden recorrer unas 18 millas en 10 días.



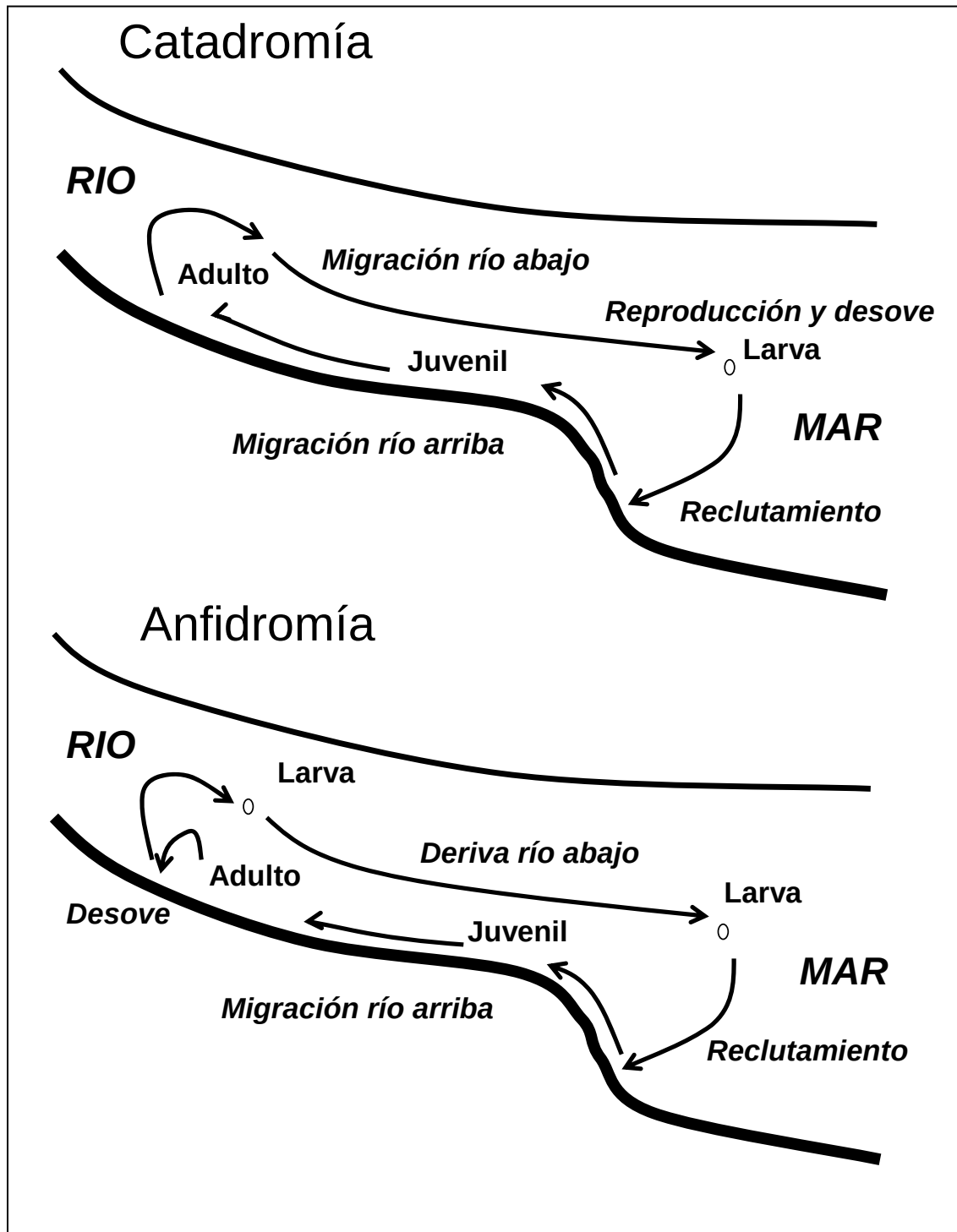


Ilustración 3.14 Ciclos de vida de la fauna nativa de los ríos y estuarios de Puerto Rico

Las migraciones río arriba de camarones juveniles *Macrobrachium*, que pueden ocurrir al mismo tiempo que las del cetí (Erdman, 1986), son aparentemente comunes en los Ríos Grande de Arecibo y Grande de Manatí y han sido incorporadas en la cultura popular. Existen varios estudios sobre la distribución y dinámica de las poblaciones de los camarones *Atya* y *Xiphocaris* (Covich y colaboradores, 1991, 1996 y 2003; Pyron y colaboradores, 1999), pero sus migraciones han sido menos estudiadas. Se conoce que las postlarvas y juveniles migran aguas arriba entre febrero y abril (véase Ilustración 3.15), mientras que las larvas migran hacia el mar entre septiembre y octubre durante la época reproductiva de los adultos (Scatena, 2001). La migración en ambas direcciones ocurre mayormente de noche para evitar la depredación (March y colaboradores, 1998; Johnson y Covich, 2000).



Ilustración 3.15 Larvas de camarones migrando río arriba sobre una estructura de cemento.  
Foto: Beverly Yoshioka (FWS)

Estudios recientes (Pyron y Covich, 2003; Blanco, 2005) también reportan la ocurrencia de migraciones masivas de caracoles burgao (*Neritina*) en los ríos Mameyes y Espíritu Santo en el área del Yunque. Estas migraciones ocurren varios días después de las crecientes a lo largo de todo el año, pero son más frecuentes en la época de lluvias entre agosto y diciembre. Grupos de hasta 200 mil individuos (con densidades de hasta 7,000 individuos por metro cuadrado) se han observado en la parte baja del Río Mameyes (véase Ilustración 3.16). Durante estas migraciones los individuos recorren cerca de 50 metros (150 pies) diarios (Blanco, 2005).



Ilustración 3.16 Juveniles del caracol Burgao (*Neritina virginea*) migrando río arriba en el Río Mameyes. También se observan dos Dajaos. Foto: Dr. Juan F. Blanco

### 3.5 Uso de agua en Puerto Rico



El uso de agua se puede clasificar como “consuntivo” o “no consuntivo”<sup>1</sup>. Se entiende como consuntivo los usos que típicamente crean limitaciones para su utilización subsiguiente debido a un cambio en su calidad o sitio de disposición. Ejemplos del uso consuntivo incluyen el uso doméstico, industrial y agrícola. Usos no-consuntivos incluyen aquellos en que se aprovecha el agua, pero no se consume, liberándola cercano a su punto de extracción luego de su uso. Ejemplos de este último es el pasar agua por turbinas hidroeléctricas o utilizar agua en los sistemas de enfriamiento a base de intercambio de calor.

De acuerdo con los datos recopilados por el USGS, en Puerto Rico se extrajeron 673 mgd de agua dulce para satisfacer las necesidades sociales y económicas del País durante el año 2004. De este total, 526 mgd (78%) provienen de fuentes superficiales y 147 mgd (22%) de agua subterránea. Los embalses constituyen la principal fuente de abasto, proveyendo 370 mgd (70%) mientras que las tomas directas de ríos aportaron 156 mgd (30%).

El abasto doméstico es de 598 mgd, lo que representa un 89% de la utilización del agua dulce y es el principal renglón de uso del agua extraída de las fuentes en Puerto Rico (véase Ilustración 3.17). El abasto doméstico incluye los usos de los sectores servidos por la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados (AAA): residencial, comercial, industria liviana, gobierno y uso público y las de

---

<sup>1</sup> Según la Enciclopedia Libre en Internet, Wikipedia, uso consuntivo es el uso del agua que no se devuelve en forma inmediata al [ciclo del agua](#). Por ejemplo, el [riego](#) es un uso consuntivo, mientras que la [generación de energía eléctrica](#) mediante el movimiento de turbinas por el agua de un río, si la descarga es en el mismo río, no es un uso consuntivo.



comunidades y familias que operan sus propios sistemas de extracción de agua (sistemas Non-PRASA).

El sector agrícola utiliza un total de 64 mgd para cultivo y crianza de animales. La mitad de esta agua, 32 mgd, proviene de pozos operados por los propios agricultores y los restantes 32 mgd de los sistemas de riego operados por la Autoridad de Energía Eléctrica (AEE). La industria pesada y la AEE utilizan 9.5 mgd y 1.8 mgd, respectivamente, de agua subterránea proveniente de pozos desarrollados por los dueños.

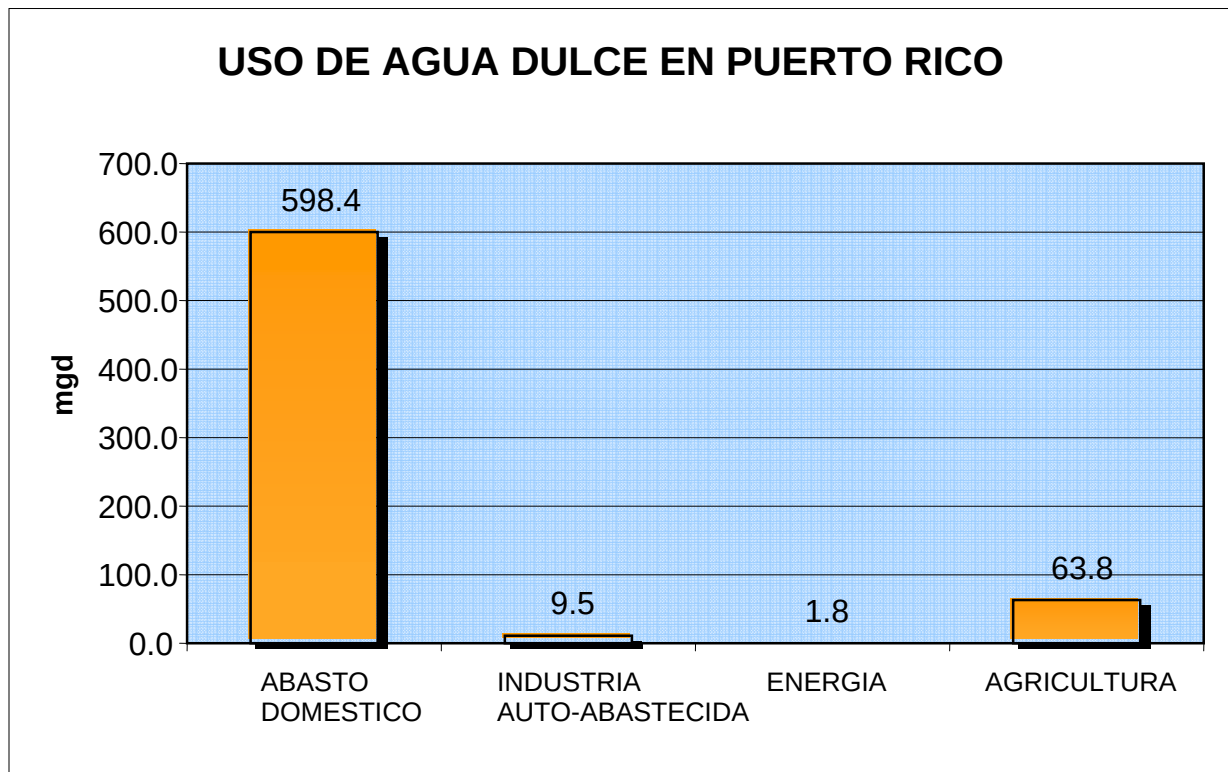


Ilustración 3.17 Uso de agua dulce en Puerto Rico. Fuente: Water Use, USGS, 2004

La AEE utiliza un promedio anual de 171 mgd de agua dulce para la generación de electricidad en las plantas hidroeléctricas. Este uso depende de la disponibilidad del agua y el patrón de demanda de energía eléctrica. Por ende, durante periodos con bastante lluvia se operan las turbinas diariamente para suplir la demanda en las horas pico, mientras que en estiaje no hay generación por la falta de agua. Luego de pasar por las turbinas, el agua utilizada es devuelta a los ríos y está disponible

para otros usos aguas abajo en la cuenca. Por ejemplo, las aguas utilizadas en las turbinas en las plantas hidroeléctricas de Caonillas y Dos Bocas son devueltas al río y utilizadas aguas abajo para suplir a la toma del proyecto del Superacueducto. De igual manera, las aguas utilizadas en las plantas hidroeléctricas Yauco I y Yauco II del sistema Lucchetti-Locho, luego son destinadas para usos agrícolas y municipales en el Valle de Lajas. Por otra parte, la AEE y Ecoeléctrica extraen aproximadamente 3,100 mgd de agua salina para enfriamiento en sus plantas generatrices de energía eléctrica. La AEE extrae agua de mar en Puerto Nuevo (San Juan), Palo Seco (Cataño), Aguirre (Salinas) y Costa Sur (Guayanilla) al igual que Ecoeléctrica. Estas aguas son descargadas nuevamente a las bahías o canales costaneros de donde fueron extraídas, pero con una temperatura mayor.

### **3.5.1 Ciclo hidrológico**

La Ilustración 3.18 describe los elementos principales de disponibilidad y uso de agua que constituyen el ciclo hidrológico de la Isla bajo condiciones promedio. Aproximadamente el 60 por ciento de la lluvia que recibe Puerto Rico regresa a la atmósfera por evaporación y por transpiración de la vegetación (evapotranspiración). Este valor promedio incluye periodos de sequía cuando casi toda la lluvia se evapora en las superficies de la vegetación o luego de infiltrarse a los suelos secos. Incluye también periodos de vaguadas y tormentas tropicales cuando el suelo está saturado y casi toda la lluvia se descarga por los ríos.

Al comparar el agua no evaporada, un promedio de 4,592 mgd con los 673 mgd utilizados en el año 2004, se puede obtener la impresión de que hay mucha agua en Puerto Rico que no se aprovecha. Este cálculo, a base de valores promedios, no toma en consideración lo siguiente:

- la gran variación en la escorrentía entre días secos y las crecidas,
- la necesidad de dedicar una cantidad significativa para la recarga de los acuíferos para minimizar la intrusión salina y
- las sequías fuertes con duración de un año o más.

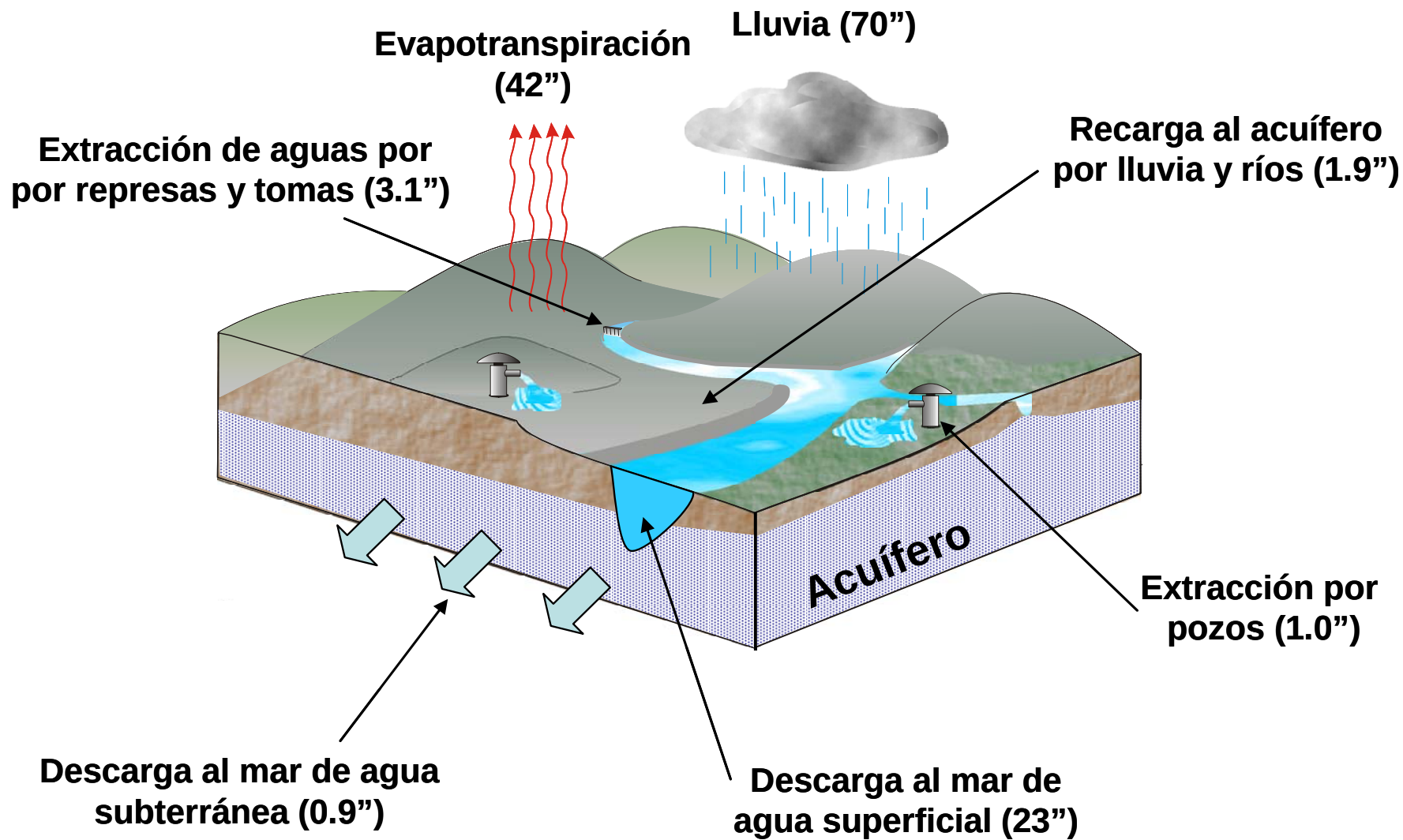


Ilustración 3.18 Ciclo hidrológico de Puerto Rico.

Tomando estos factores en consideración durante sequía, la disponibilidad del recurso agua está muy limitada en comparación a la tasa de utilización actual. Un balance de agua construido a base de las condiciones promedios incluye la cantidad del agua que consiste en flujo de crecidas, la cual no se puede capturar o utilizar debido a la pequeña capacidad de los embalses en relación a estos flujos. La alta variabilidad de los flujos y la gran aportación de agua que representan las crecidas hacen que un “balance de agua” a base de flujos promedios no sea un concepto útil para ilustrar la verdadera disponibilidad del recurso proveniente de una cuenca para establecer las estrategias de planificación.

### **3.5.2 Escorrentía superficial**

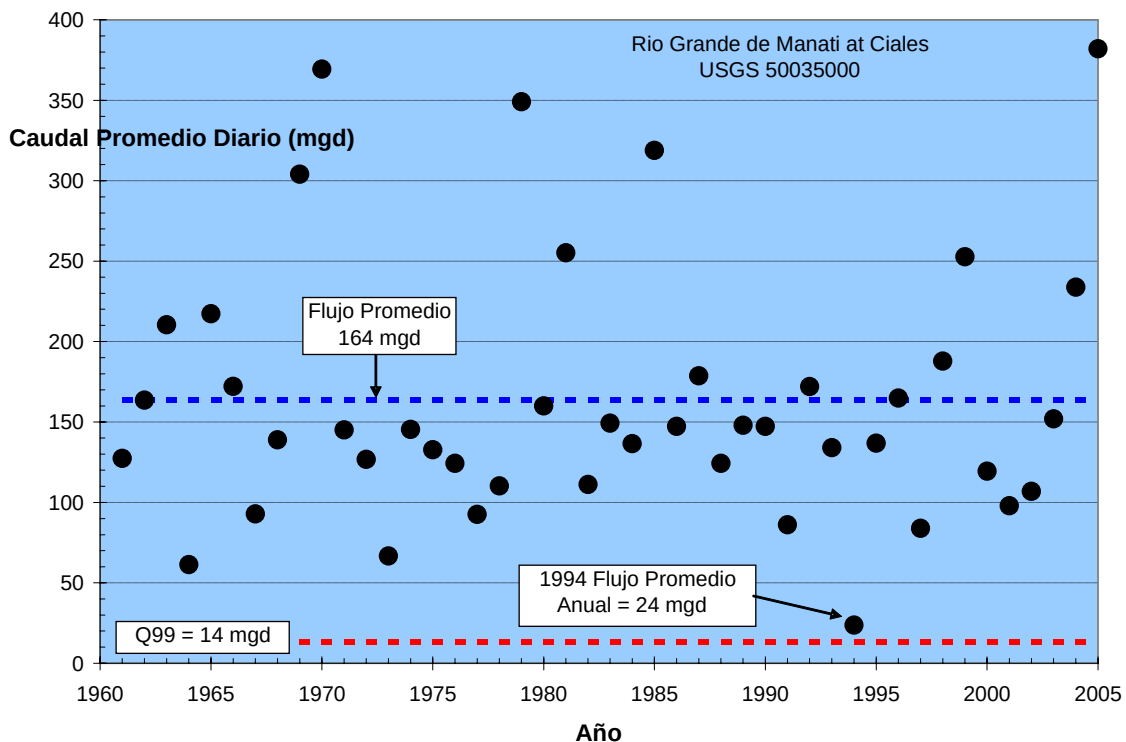
Los flujos en los ríos son altamente variables y los flujos máximos típicamente son más de 1,000 veces los flujos mínimos. A pesar de que es común usar promedios para propósitos descriptivos, en la planificación y administración de los recursos de agua lo que es importante son los eventos extremos: las sequías y las inundaciones. Los flujos extremos, particularmente los mínimos, son los flujos importantes para la vida acuática. Por tal razón, conceptos muy generalizados como balances de agua a base de valores promedios presentan información muy limitada desde el punto de vista de planificación y manejo del recurso superficial.

El planteamiento anterior se ilustra con la cuenca del Río Grande de Loíza. El balance promedio de esta cuenca refleja una precipitación anual promedio de 1,192,200 acre-pie, de la cual se evapotranspiran 960,460 acre-pie. Al descontar las extracciones de agua que se llevan a cabo en la cuenca (incluyendo la toma de la AAA en Carraízo), añadir las descargas y descontar las infiltraciones, se descarga al mar unos 236,890 acre-pie al año, equivalentes a 212 mgd. Esto es más del doble de la extracción de la AAA en Carraízo. Este balance promedio por cuenca da la impresión de que hay un gran caudal de agua disponible en el Río Grande de Loíza aguas abajo del embalse. Sin embargo, sabemos que esto no es



correcto. El rendimiento seguro computado para la estación de aforo 50059050 del USGS, ubicada 1.8 km (una milla) aguas abajo del Embalse Carraízo tiene un rendimiento seguro de sólo 0.4 mgd, aguas abajo de la represa el río es casi seco, y fluye solamente cuando las crecidas desbordan la presa. Aguas abajo de Carraízo no existe sitio para otro embalse.

Como otro ejemplo, la Ilustración 3.19 presenta la variabilidad en el caudal del Río Grande de Manatí durante varios años. La descarga del Río Grande de Manatí en el año 1994 fue tan sólo 15 por ciento del flujo promedio del récord de 45 años (Estación USGS 50035000, Río Grande de Manatí en Ciales). El 50 por ciento del flujo promedio anual es aportado por las crecidas que ocurren en tan sólo 9 por ciento de los días. En contraste, el 50 por ciento de los días con menor flujo (182 días al año) aportan solamente 14 por ciento del flujo promedio.



**Ilustración 3.19 Caudal promedio anual Río Grande de Manatí en Ciales señalando susceptibilidad a sequía extrema.**

Los eventos extremos, como son las sequías y las inundaciones, no ocurren uniformemente a través de toda la Isla. La sequía de los años 1967-68, por ejemplo, afectó principalmente la parte Este de la Isla, sin tener efecto significativo en la zona Oeste (Morris y Vázquez, 1990). En contraste, la sequía de 1994-95 afectó un área mayor, aunque partes de la Isla no experimentaron una sequía intensa aún con este evento. La Tabla 3.5 ilustra la variación en intensidad de sequía entre varias partes de la Isla en marzo de 1983 utilizando el “Palmer Meteorological Drought Index” (Palmer, 1965). Se puede observar cómo la intensidad de la sequía varía significativamente entre regiones. Este índice calcula la sequía con una duración de solamente tres meses, un periodo suficientemente extenso como para afectar a los agricultores, pero sin un impacto severo en los embalses que típicamente responden a sequías más prolongadas.

**Tabla 3.5 Intensidad de sequía desde enero hasta marzo de 1983, computado utilizando “Palmer Drought Index” (Datos de NOAA)**

| Región<br>Climatológica | Lluvia (pulg.) |           | PDI   | Categoría de<br>Sequía |
|-------------------------|----------------|-----------|-------|------------------------|
|                         | Normal         | Acumulada |       |                        |
| Costa Norte             | 9.71           | 2.84      | -4.73 | Extrema                |
| Costa Sur               | 3.93           | 4.06      | +1.12 | Ninguna                |
| Pendientes Norteñas     | 9.46           | 3.23      | -3.34 | Severa                 |
| Pendientes Sureñas      | 5.96           | 4.04      | -3.19 | Severa                 |
| Este Interior           | 11.01          | 9.52      | +0.53 | Ninguna                |
| Oeste Interior          | 9.45           | 5.72      | -3.44 | Severa                 |

PDI= Palmer Drought Index, Fuente: DRNA, 1984

### 3.5.3 El concepto de rendimiento seguro

Debido a los impactos económicos adversos y disloques sociales ocasionados por la falta del agua, los sistemas de abasto doméstico e industrial deben proveer un alto nivel de confianza para evitar tener que interrumpir el servicio, aún en períodos de sequía. El rendimiento seguro de una fuente de abasto se define como la

cantidad de agua que puede ser extraída de forma confiable y sin producir una escasez intolerable aún durante la sequía más intensa. El estándar de diseño para abastos domésticos e industriales es de mantener el flujo normal el 99 por ciento del tiempo ( $Q_{99}$ ). En un por ciento (1%) de los días, el racionamiento debe ser de un nivel tolerable. El cumplimiento con este criterio conlleva proveer un servicio donde no haya racionamiento en más de 36 días en cada década. En el diseño de sistemas de riego es común planificar a base de un nivel de confianza más cercano al 90 por ciento, pero este número varía de acuerdo al valor de la cosecha.

Niveles de confianza altos en el suministro de agua para uso doméstico sólo pueden ser alcanzados si la capacidad de la planta de filtración coincide con el rendimiento seguro de la fuente de abasto. En muchas áreas de Puerto Rico hay racionamiento de servicio en periodos de precipitación baja debido a que las plantas de filtración normalmente operan a una capacidad muy superior al rendimiento seguro de su fuente de abasto, produciendo una reducción dramática en la tasa de extracción acostumbrada durante periodos de sequía. Por ejemplo, durante la sequía de 1994 la extracción del Embalse Carraízo (supliendo a la planta de filtración Sergio Cuevas), fue reducida a solamente 30% de su producción normal, y La Plata fue reducida a 33%.

### **3.5.4 Requerimiento de flujos ambientales**

Los requerimientos de flujos ambientales mínimos se comenzaron a implantar a partir de la década del noventa (1990). En la práctica, los requerimientos de flujos ambientales mínimos son determinados por las agencias reguladoras caso a caso. Por regla general se ha requerido que las tomas nuevas o aquellas rehabilitadas dejen en el río un flujo mínimo equivalente a la mitad del  $Q_{99}$ <sup>2</sup>. Sin embargo, debido

---

<sup>2</sup> Este estándar sirve exclusivamente para calcular la extracción de agua con el fin de lograr niveles de confianza altos en el suministro de agua potable. Por tal razón, no contempla criterios para mantener la integridad ecológica del cuerpo de agua.

a que pocos ríos aún preservan sus caudales relativamente intactos y dado la alta densidad de tomas en los ríos (véase Ilustración 3.20), el Departamento ha determinado que es necesario aplicar un estándar de flujo ambiental más estricto en protección de la vida acuática, y solicitará el mantener un flujo mínimo de  $Q_{99}$  aguas abajo de tomas nuevas. Este caudal ha sido identificado como el flujo mínimo necesario para sostener un hábitat acuático utilizable, según estudios por Scatena y Johnson (2001). Además, se deben incorporar en el diseño y operación de sistemas de extracción los elementos necesarios para mantener las vías migratorias de las especies nativas en cada río.

### **3.5.5 Rendimiento seguro de tomas superficiales**

El ritmo de extracción al que puede ser sometido un río está limitado por la magnitud del flujo que discurre en el lugar de la toma en cualquier momento determinado. El rendimiento seguro del río, en el lugar de la toma, se computa ordenando una serie histórica de datos de flujo promedio diario para determinar el valor excedido el 99 por ciento del tiempo. Por norma, sólo se permite extraer el flujo que excede al que es requerido para sostener las necesidades ambientales del ecosistema acuático. Por lo tanto, el flujo disponible para usos doméstico, industrial y agrícola es, en teoría, el excedente del  $Q_{99}$ . Sin embargo, hay muchos sitios en la Isla donde las tomas y los embalses desvían la totalidad del flujo, sin mantener un flujo ambiental aguas abajo. Por esta razón, el DRNA le ha establecido a las franquicias nuevas el requisito de proveer un flujo ambiental mínimo igual o superior al  $Q_{99}$ .

El Apéndice A incluye estimados de rendimiento seguro para cada una de las tomas activas de la AAA que se muestran en la Ilustración 3.20. Existen tomas de agua en casi todos los ríos de la Isla. El potencial de ampliar el volumen de extracción en ríos es muy poco, y de considerar las necesidades ambientales, los ríos del País podrían considerarse como “sobreexplotados”.



PLAN INTEGRAL DE RECURSOS DE AGUA  
ABRIL, 2008

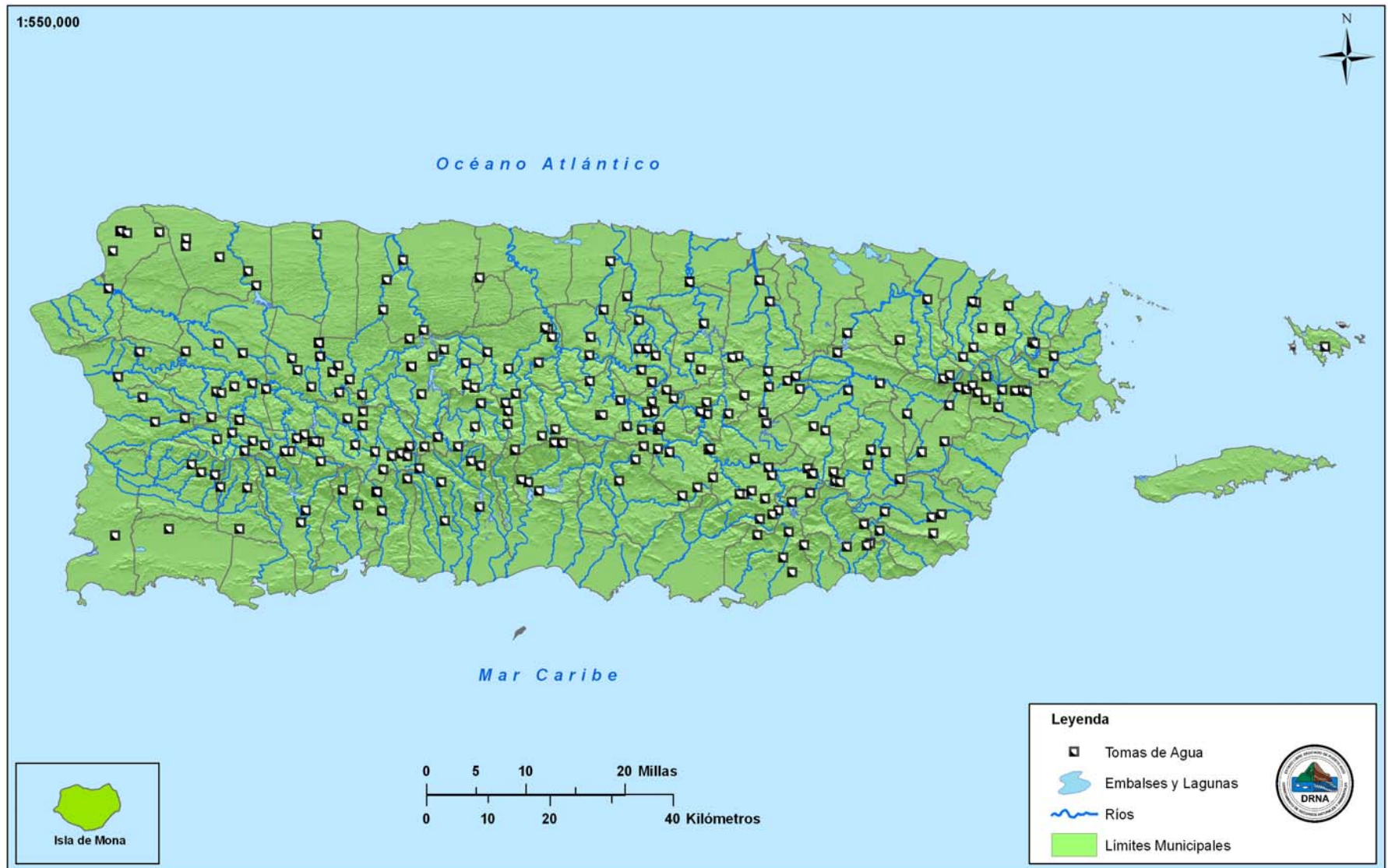


Ilustración 3.20 Tomas de agua de la AAA. DRNA, 2004

### 3.5.6 Rendimiento seguro de embalses

La construcción de embalses permite almacenar parte del flujo de los caudales altos para ser utilizado en periodos más secos. De esta manera, la disponibilidad del recurso es mayor de la que podría ser obtenida mediante una toma superficial sin almacenaje. El comportamiento de un embalse se puede simular por medio de un balance de masa, expresado en su forma más sencilla por la ecuación:

$$\text{Volumen 2} = \text{Volumen 1} - \text{Extracción 1} - \text{Agua Vertida 1} + \text{Afluencia 1} + (\text{Lluvia} - \text{Evaporación})$$

Esta ecuación lo que significa es que el volumen de agua dentro un embalse en un día en particular (Volumen 2) es igual al volumen que había en el embalse en el día anterior (Volumen 1), menos la extracción realizada, menos el volumen de agua que se vierte o se desborda por la presa, más el agua que llega al embalse de su cuenca tributaria (Afluencia 1) más la diferencia entre la lluvia que cae sobre el embalse y la evaporación desde su superficie. En Puerto Rico el balance neto entre lluvia y evaporación sobre la superficie del embalse es poco significativo y generalmente no se calcula.

El rendimiento seguro de los embalses utilizados para abasto público se ha definido como la razón de extracción que puede sostenerse durante un evento histórico de sequía extrema, sin que sea necesario racionar el agua por más de un por ciento (1%) de los días y se mantiene la extracción en 75% de lo normal en los días de racionamiento.

El Apéndice A presenta estimados de rendimiento seguro para los embalses del País según su volumen de almacenaje actual e incluye los embalses existentes y los propuestos. Los valores de rendimiento seguro que se presentan para los nuevos embalses consideran mantener un flujo, aguas abajo de la presa, equivalente a la totalidad del  $Q_{99}$  del río con el objetivo de preservar los ecosistemas acuáticos. La mayoría de los embalses al presente no mantienen un flujo ambiental

aguas abajo. El análisis se hace a base de que el racionamiento se inicie una vez el volumen de agua restante en el embalse sea el 25 por ciento de su volumen total y el racionamiento se realiza mediante una reducción de 25 por ciento en su tasa de extracción. Bajo esta regla y los rendimientos informados, los embalses nunca se secan aún con las sequías severas registradas en Puerto Rico hasta la fecha.

Los embalses son las estructuras más importantes en el sistema de suministro de agua en Puerto Rico. Sin embargo, hay varios factores que limitan severamente la construcción de embalses nuevos. El estudio de sitios con potencial para la construcción de embalses en Puerto Rico, preparado para AFI (Gregory L. Morris Engineering, 2005), reveló las siguientes limitaciones:

- Tienen costos económicos altos. El costo de construcción de un embalse es generalmente superior a \$5 millones por cada mgd de rendimiento seguro. Este costo se limita a los costos de construcción de la represa y la compra de terrenos y no incluye el costo de la planta de filtración y otra infraestructura, lo cual puede duplicar el costo total de la obra.
- Los embalses convencionales no se consideran sostenibles porque pierden su capacidad rápidamente debido a la sedimentación.
- Las construcciones residenciales y el desparrame urbano están progresivamente ocupando los sitios más aptos para la construcción de los embalses, y son muy pocos los sitios en donde se puede construir un embalse nuevo sin el desplazamiento de docenas de familias.
- Tienen impactos ambientales, incluyendo el consumo de grandes áreas de terrenos (más de 1,000 cuerdas en algunos de los embalses potenciales de mayor capacidad) y la interrupción de vías migratorias acuáticas.

En resumen, existen pocos sitios adicionales aptos para la construcción de embalses nuevos.



El volumen de almacenaje de un embalse es un elemento crítico en la determinación del rendimiento seguro del mismo. La Ilustración 3.21 presenta la relación entre volumen de almacenaje y rendimiento seguro para el embalse La Plata. Esta relación se desarrolla para cada embalse existente y propuesto y se utiliza para ayudar a escoger el volumen de embalses nuevos en la etapa de diseño. Además, se utiliza para cuantificar el impacto de la sedimentación en embalses existentes y propuestos ya que su rendimiento disminuye en la medida en que se pierde capacidad de almacenaje como consecuencia del proceso de sedimentación.

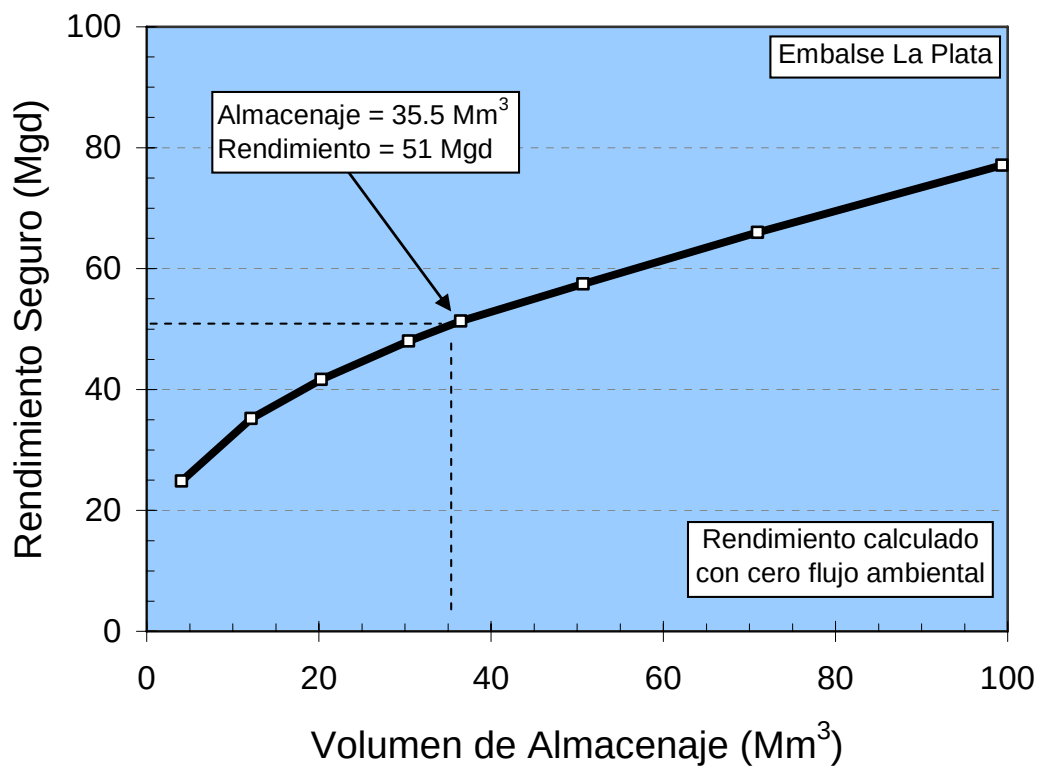


Ilustración 3.21 Relación entre volumen y rendimiento seguro para el Embalse La Plata en Toa Alta

### **3.5.7 Rendimiento seguro de los principales acuíferos**

El rendimiento seguro de un acuífero se define como la cantidad de agua que puede ser extraída, sin que se produzca un deterioro a largo plazo en la calidad y caudal del mismo. Su valor está determinado por las características físicas particulares de las formaciones geológicas que lo componen y las fuentes de recarga que lo alimentan. En los acuíferos costeros el caudal disponible está muy relacionado a la configuración y operación del sistema de extracción del agua. La explotación sostenible del agua subterránea siempre requiere una razón de bombeo inferior a la totalidad de la recarga, pero en los acuíferos costeros, los cuales contienen agua salobre en adición al agua dulce, la tasa de extracción sostenible es menos que la recarga porque siempre tiene que mantener flujo hacia el mar para frenar el proceso de la intrusión salina. Las variaciones en los niveles de agua en los pozos del área de Santa Isabel, una zona afectada por bombeo intensivo e intrusión salina, se presentan en la Ilustración 3.22. El proceso de la intrusión salina se discute en mayor detalle en la Sección 6.4.2.

En Puerto Rico, los acuíferos más productivos son los acuíferos costeros donde el agua subterránea interactúa de forma dinámica con el agua del mar y el agua dulce “flota” encima del agua salina dentro del acuífero. Existe una interfase entre el agua salina y el agua dulce cuya posición depende de factores como la permeabilidad de la formación y el flujo del agua dulce. Cualquier bombeo de agua dulce reduce el flujo descargado hacia el mar, favoreciendo el flujo de agua de mar hacia el acuífero. La inversión en el flujo del agua es un proceso conocido como intrusión salina. La migración tierra adentro de la interfase entre agua dulce y salina es una consecuencia natural del bombeo de pozos costeros, pero un exceso de bombeo puede ocasionar un exceso de la intrusión salina, dañando así partes del acuífero. El impacto de la intrusión salina puede minimizarse manteniendo una razón de bombeo sustancialmente inferior a la recarga promedio y optimizando la localización de los pozos.



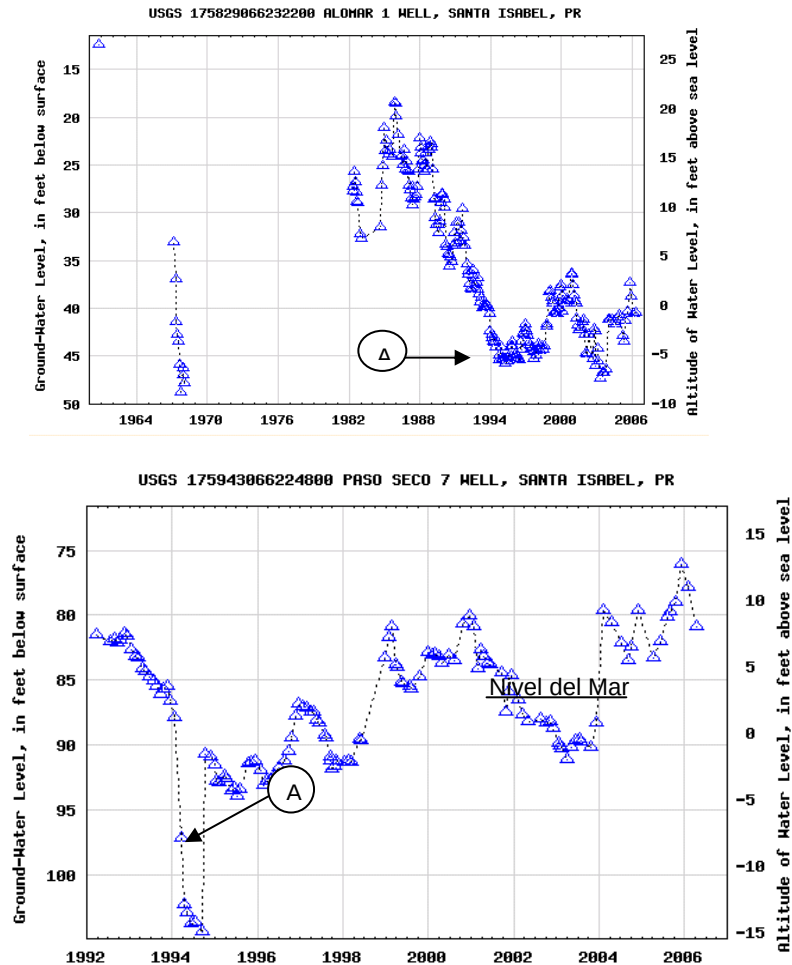


Ilustración 3.22 Comportamiento de pozos de rastreo en la Costa Sur, señalando la variabilidad en el nivel del agua debido a eventos de recarga y bombeo. (A) reducción de nivel durante la sequía de 1994-95. Fuente de datos: USGS.

### 3.6 Enfoque para mejorar la disponibilidad del recurso

Existen alternativas para aumentar la disponibilidad del recurso agua en Puerto Rico, pero para aprovechar una fuente de abasto es necesario construir obras e instalaciones de extracción, almacenaje, tratamiento y distribución. El desarrollo de las mismas implica costos económicos sustanciales y la escasez de recursos económicos impone límites severos a las opciones viables para el desarrollo de abastos de agua. Además, plantea la posibilidad de que diversos usuarios tengan que competir por la asignación de un mismo recurso.

En Puerto Rico, las opciones de abasto de menor costo (pozos y tomas de ríos) ya han sido altamente desarrolladas. Varios de los embalses que son fuentes importantes de suministro de agua dulce están confrontando problemas de sedimentación, y la contaminación de los acuíferos ha tenido un impacto sustancial en el suministro del recurso de esa fuente. Es decir, no sólo es más costoso el desarrollo de fuentes nuevas de abasto de agua, sino que simultáneamente se están perdiendo progresivamente las fuentes de abastos ya desarrolladas. Además, los datos de la AAA revelan que, en el año 2004, más del 50 por ciento del agua producida fue *“no-contabilizada”*.

Ante esta situación se hace imprescindible que el manejo del agua del País concentre esfuerzos en acciones dirigidas a mejorar la eficiencia en su uso y asegurar la integridad de los sistemas que sostienen la disponibilidad actual del recurso de las fuentes de abasto ya desarrolladas. En esta dirección deben tener prioridad proyectos tales como la implantación de un programa que atienda efectivamente el problema del agua no contabilizada, la conservación del agua, el manejo de la sedimentación en los embalses y la protección y optimización de la utilización de los acuíferos para maximizar su rendimiento sostenible. Estas acciones son discutidas en el Capítulo 7.

El cuadro actual pone en duda el potencial de seguir expandiendo la utilización del recurso mediante la alternativa tradicional de desarrollar fuentes de abasto nuevas. El costo financiero de las estrategias nuevas que se proponen en este Plan es significativo, pero es menor que el costo ascendente de desarrollar abastos nuevos con las alternativas utilizadas tradicionalmente.

### **3.7 Cambio climático**

El cambio climático es un tema que cada vez genera más preocupación e interés por parte de distintos sectores de la sociedad, por sus abarcadoras consecuencias.

Existe evidencia que indica que el calentamiento global, causado por las actividades humanas, particularmente el uso masivo de combustibles fósiles, se está convirtiendo en una amenaza real.

El aumento constante y progresivo en las temperaturas registradas en los últimos 100 años (véase Ilustración 3.23), está generando importantes impactos sobre los elementos esenciales que constituyen la forma de vida de todas las sociedades (clima, geografía y ecosistemas). Muchos de estos efectos ya tienen lugar y es la causa de fenómenos inusuales en distintas partes del mundo. La mayor parte de los modelos que se han desarrollado en torno al calentamiento global apuntan a que todos los países serán afectados, de alguna manera, por este fenómeno.

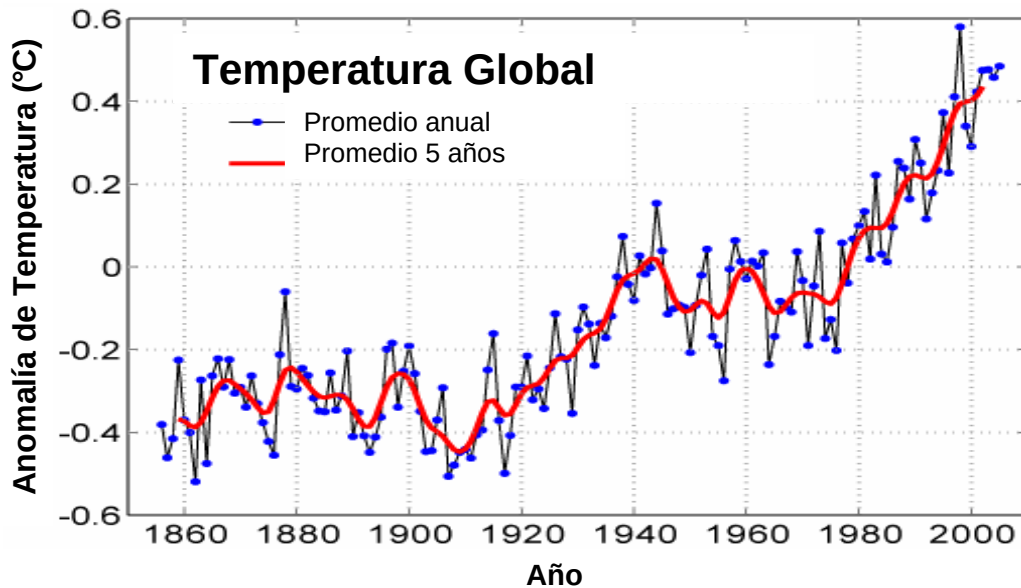


Ilustración 3.23 Temperatura mundial. Fuente: Hadley Centre for Climate Prediction and Research of the UK Meteorological Office.

Según el Grupo Intergubernamental sobre el Cambio Climático de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) (IPCC, por sus siglas en inglés), el proceso de calentamiento global causará la expansión del agua en el mar según ésta se calienta. Este evento, junto al deshielo de glaciales terrestres, aumentará el nivel del mar entre 28 a 58 cm (11 a 23 pulgadas) durante el Siglo 21 (IPCC, 2007).

Los impactos asociados con el aumento del nivel del mar incluyen la erosión acelerada de las costas, un aumento en los niveles de inundación costanera y a lo largo de los tramos de los ríos bajo la influencia del mar, la inundación de humedales costeros, la extensión tierra adentro de los terrenos anegados por el efecto del mar e impactos a los ecosistemas estuarinos. De acuerdo al Banco Mundial, la elevación del nivel del mar amenazará una gran parte de la infraestructura industrial, turística, energética, de transportes y comunicaciones que se encuentra concentrada en las zonas costeras.

En cuanto al costo económico, el IPCC ha estimado que el costo de protección de las costas del Mar Caribe contra el incremento futuro del nivel del mar podría ascender hasta \$11,000 millones de dólares, una cantidad muy superior a la capacidad combinada de inversión de las economías caribeñas. En muchos lugares del mundo ya es un hecho que el aumento del nivel del mar, producto del calentamiento global, ha provocado la reducción de las líneas de costa y, además, es responsable de la pérdida de terrenos costeros a causa de la penetración de las aguas tierra adentro.

También se asocia al calentamiento global el aumento en la intensidad de tormentas tropicales, incluyendo los huracanes, debido a que la potencia de estos fenómenos crece según aumenta el calor, y particularmente la temperatura del agua. Esto puede tener como resultado un aumento en la severidad de las inundaciones, sin que aumente (con toda probabilidad) la disponibilidad de agua dulce para los abastos públicos. El aumento en la magnitud de las crecidas extraordinarias y relativamente infrecuentes no implicará un aumento en el volumen de agua aprovechable para el abasto, ya que en el Caribe se ha pronosticado una reducción de lluvia durante el verano, el tiempo más crítico desde el punto de vista de sequía. Lo que sí podría aumentar es la tasa de sedimentación de los embalses.

### Algunos de los efectos esperados del calentamiento global sobre las islas

- A través de todo el mundo, las islas, irrespectivo de su localización (ya sea en los trópicos o en latitudes extremas), poseen características geográficas que las hacen especialmente vulnerables a los efectos del calentamiento global, debido al aumento en los niveles del océano y en la frecuencia de eventos climatológico-atmosféricos extremos.
- La erosión costera y el blanqueamiento de los corales producen un deterioro en las condiciones de la costa que a su vez pudieran afectar recursos tales como la playa, infraestructura urbana costera, y recursos ambientales incluyendo la pesca y lugares de recreación y turismo.
- El aumento en los niveles de los océanos produce un incremento en los niveles de las inundaciones por marejadas ciclónicas, y también afecta el nivel de inundación por los ríos en las zonas cercanas a la costa.
- Se proyecta una reducción en los recursos de agua para la mitad de siglo 21 en muchas de las islas del Mar Caribe y del Océano Pacífico debido al calentamiento global, al punto de no poder suplir la demanda para el sostenimiento de su población durante temporadas de baja precipitación.
- Al haber temperaturas más altas se prevé que ocurra una mayor invasión de especies no nativas, particularmente en islas en latitudes medianas y altas.

### Efectos potenciales en Puerto Rico

Lo descrito anteriormente tendrá seguramente su manifestación en el País. El impacto del aumento del nivel del mar producto del calentamiento global es mayor



en el caso de islas como Puerto Rico, debido a la extensión de su costa y la concentración de infraestructura en la zona costanera.

En relación al cambio de temperatura promedio, Puerto Rico se encuentra en una de las zonas de impacto menor, con una proyección de aumento en la temperatura de 0.9° a 1.8° F (0.5 a 1.0°C) en el periodo del año 2000 a 2050, presumiendo que las tendencias actuales continúan. En contraste, el mismo modelo predice aumentos en temperaturas promedio de 3.6 a 7.2° F (2 a 4°C) en la mayor parte de los EE.UU. y Canadá, y hasta 15.8°F (8.8°C) en el Mar Ártico.

Con relación a la precipitación pluvial se proyecta una reducción de 2 a 6 pulgadas (50 a 150 mm) al año en el área de Puerto Rico, equivalente a una reducción de 5% a 10% aproximadamente. Neelin et. al. (2006) han observado que los modelos climáticos pronostican veranos más secos en el Caribe, lo que tendría un impacto particularmente adverso sobre el abasto público ya que el racionamiento de agua típicamente coincide con los meses de verano. En conclusión, de seguir el proceso de calentamiento global, Puerto Rico puede esperar una reducción en la disponibilidad del agua dulce en comparación con la condición actual.

La información disponible permite anticipar que las consecuencias del cambio climático sobre Puerto Rico se manifestarán en, por lo menos, los siguientes elementos:

1. Aumento en la temperatura del aire y mar.
2. Huracanes más intensos.
3. Inundaciones más severas, y en zonas costeras también inundaciones más frecuentes.
4. Sequías más severas.
5. Aumento en el nivel del mar.

Estos cinco elementos tendrán su efecto en el recurso agua y su disponibilidad, lo cual planteará retos muy serios en su uso y manejo. En ese sentido, es medular para el Plan de Aguas reconocer las consecuencias que tendrá el cambio climático en Puerto Rico e incorporarlas en las estrategias recomendadas. Por esta razón, las acciones dirigidas al uso y aprovechamiento eficiente del recurso y la protección y conservación del mismo quedan reforzadas y tienen carácter ineludible.

#### Recomendaciones generales de acción en Puerto Rico

El reto presentado por los posibles impactos del calentamiento global obliga a implementar estrategias para el mejor manejo del recurso agua en Puerto Rico. Entre las medidas a considerar para atenuar el efecto que el calentamiento global pudiera tener sobre los recursos de agua del País se encuentran los siguientes:

1. Desarrollar e implantar estrategias orientadas al uso sabio del recurso agua, ante la expectativa de que los eventos de sequía pueden ser aún más frecuentes o fuertes en el futuro.
2. Desarrollar e implantar estrategias de manejo de suelos que protejan los sitios con potencial de ubicación de embalses, ante la probabilidad alta de necesitarlos en el futuro para contrarrestar un incremento en la severidad de las sequías.
3. Desarrollar e implantar estrategias para el control de sedimentación en los embalses para preservar la capacidad actual, y hacer sostenible los embalses futuros, ante la posibilidad de un aumento en la severidad de los eventos de huracanes que pueden transportar muchos sedimentos por los ríos.
4. Analizar el posible impacto del aumento en el nivel del mar sobre acuíferos sujeto a la intrusión salina.