

ÍNDICE

1 INTRODUCCIÓN	5
2 PRINCIPALES LINEAMIENTOS SOCIO ECONÓMICOS GENERALES	6
3 CLIMATOLOGÍA	11
4 OROGRAFÍA , HIDROGRAFÍA Y GEOMORFOLOGÍA	13
5 LINEAMIENTOS GEOLÓGICOS Y TECTÓNICOS	16
5.1 Geología	16
5.2 Tectónica	21
6 ACTIVIDADES DE CAMPO Y ESTUDIOS	22
6.1 Actividades preliminares	22
6.1.1 Colección de los datos y recopilación de antecedentes	22
6.1.2 Inventario de puntos de agua	26
6.2 Base de datos y Sistema de Información Geográfica (SIG)	30
6.2.1 Realización de una base de datos	30
6.2.2 Implementación de un sistema de información geográfica	31
6.3 Piezometría	34
6.3.1 Campañas piezométricas	34
6.3.2 Determinación de las coordenadas plano-altimétricas de puntos de agua	36
6.3.3 Levantamiento taquimétrico de puntos de agua	38
6.4 Hidroquímica e intrusión marina	40
6.4.1 Muestreo y análisis para la calidad de las aguas	40
6.4.2 Muestreo y análisis isotópicas	42
6.4.3 Muestreo y análisis para la potabilidad	42
6.4.4 Muestreo y análisis para aguas minerales y minero-medicinales	45
6.4.5 Control de la salinidad y de la intrusión marina	47
6.5 Geofísica	48
6.5.1 Objetivos de las campañas geofísicas	48
6.5.2 Cantidades previstas y ejecutadas	48
6.5.3 Metodologías de prospección y de interpretación utilizadas	48
6.5.4 Equipos utilizados	51
6.5.5 Interpretación de los resultados	51
6.6 Realización de sondeos de exploración, de pozos de observación y de ensayos de bombeo	54

6.6.1 Realización de los sondeos de exploración y de los pozos de observación	54
6.6.2 Realización de ensayos de bombeo	56
6.7 Integración de la red meteorológica existente	58
6.8 Hidrología	60
6.8.1 Campañas de aforos en los ríos y canales	60
6.8.2 Instalación de regletas hidrométricas	61
6.8.3 Evaluación de la recarga	61
6.9 Agronomía - Edafología	63
6.9.1 Campaña agronómica y edafológica	63
6.9.2 Identificación zonas con regadío actual y de zonas potencialmente regables	64
6.10 Evaluación de la utilización del agua	69
6.10.1 Instalación de contadores volumétricos	69
6.10.2 Balances hídricos aguas subterráneas	70
6.10.3 Balances hídricos aguas superficiales	71
6.11 Cartografía temática	73
6.11.1 Realización de cartografía hidrogeológica	73
6.11.2 Realización de cartografía de vulnerabilidad	74
6.12 Modelización	83
6.12.1 Modelos matemáticos de flujo de las aguas subterráneas y de la intrusión marina	83
6.12.2 Utilización conjunta de las aguas subterráneas y superficiales	86
6.13 Ensayos de recarga inducida	87
7 RESULTADOS OBTENIDOS	89
7.1 Acuíferos y aguas subterráneas	89
7.1.1 Caracterización hidrogeológica de las diferentes formaciones geológicas	89
7.1.2 Pozos, sondeos y manantiales	94
7.1.3 Piezometría	94
7.1.4 Calidad de las aguas subterráneas - caracterización hidroquímica	98
7.1.5 Salinidad e intrusión marina	103
7.1.6 Resultados análisis isotópicos, edad de las aguas y zonas de recarga	104
7.1.7 Relaciones ríos-acuíferos	105
7.1.8 Evaluación de la recarga - infiltración eficaz	106
7.1.9 Modelos matemáticos de flujo y de intrusión marina	107
7.1.10 Recursos hídricos y reservas hídricas	108
7.1.11 Utilización de las aguas subterráneas	109
7.1.12 Vulnerabilidad	110
7.1.13 Recarga inducida	112
7.2 Aguas superficiales	114
7.2.1 Régimen hidrológico y recursos hídricos	114

7.2.2 Utilización de las aguas superficiales	115
7.3 Agronomía - Edafología	117
7.3.1 Campaña agronómica y edafológica	117
7.3.2 Identificación de zonas con regadío actual	117
8 CANTIDADES EXPLOTABLES DE AGUA	119
9 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	120
9.1 Resumen de datos generales y socio-económicos	120
9.2 Clima	122
9.3 Orografía, Hidrografía y Geomorfología	123
9.4 Geología y tectónica	124
9.4.1 Geología	124
9.4.2 Tectónica	125
9.5 Actividades preliminares, base de datos y SIG	126
9.6 Actividades de campo y estudios	128
9.6.1 Monitoreo piezométrico y actividades relacionadas	128
9.6.2 Monitoreo de calidad	129
9.6.3 Monitoreos especiales (isotopos, aguas minero-medicinales, potabilidad)	129
9.6.4 Control de la salinidad y de la intrusión marina	129
9.6.5 Geofísica	130
9.6.6 Perforación y ensayos de bombeo	130
9.6.7 Integración de la red meteorológica existente	132
9.6.8 Campañas de aforos directos e instalación regletas hidrométricas	133
9.6.9 Actividades agronómicas y edafológicas	134
9.6.10 Evaluación de la utilización del agua - Balance hídrico	136
9.6.11 Cartografía temática	137
9.6.12 Modelización aguas subterráneas	138
9.7 Resultados obtenidos	140
9.7.1 Caracterización hidrogeológicas de las diferentes formaciones geológicas y acuíferos presentes	140
9.7.2 Pozos, sondeos y manantiales	141
9.7.3 Piezometría	141
9.7.4 Calidad de las aguas subterráneas y caracterización hidroquímica	143
9.7.5 Salinidad e ingresión marina	144
9.7.6 Resultados análisis isotópicas	145
9.7.7 Relaciones ríos-acuíferos	146
9.7.8 Evaluación de la recarga - infiltración eficaz	148
9.7.9 Vulnerabilidad	149
9.7.10 Modelos matemáticos de flujo de las aguas subterráneas	149
9.7.11 Recursos hídricos y reservas hídricas subterráneas	151
9.7.12 Régimen hidrológico y recursos hídricos superficiales	152

9.7.13 Identificación de zonas con regadío actual y potencialmente regables - Evaluación de las necesidades hídricas para el riego	153
9.7.14 Utilización de las aguas subterráneas	154
9.7.15 Utilización de las aguas superficiales	155
9.7.16 Cantidades explotables de agua	156
9.8 Recomendaciones	157
FIGURAS	163
TABLAS	164

1 INTRODUCCIÓN

Este informe presenta las actividades, las elaboraciones y los resultados del proyecto Estudio Hidrogeológico Nacional en la zona denominada “Planicie Costera Oriental”, conforme al capítulo 6 de los Términos de Referencia y a los acuerdos y decisiones tomadas en el curso de la realización del estudio.

El área de estudio (ver Fig. 1/1), comprendida entre 18° 12' 17" y 18° 57' 41" de Latitud Norte y entre 68° 19' 10" y 70° 09' 03" de Longitud Oeste, tiene una superficie de aproximadamente 7,194 Km².

En el capítulo 2 se resumen los principales lineamientos socio económicos generales.

En el capítulo 3 se describen las características climatológicas del área, en el capítulo 4 la orografía, hidrografía y geomorfología, y en el capítulo 5 los lineamientos geológicos y tectónicos.

En el capítulo 6, por cada disciplina/método aplicado, se hace un tratamiento de las actividades de campo y de oficina llevadas a cabo desde el inicio del proyecto, incluyendo los métodos utilizados para las elaboraciones y las interpretaciones de los datos.

En el capítulo 7 se encuentran reunidos todos los resultados alcanzados en los diferentes aspectos/componentes del estudio hidrogeológico.

En el capítulo 8 se indican de forma clara y lineal las cantidades de agua subterránea y/o superficial explotables para satisfacer a las demandas de los diferentes sectores / tipos de usuario.

En el último capítulo, el 9, se reúnen las conclusiones del estudio y las recomendaciones incluyendo la indicación de futuros proyectos a desarrollar para un manejo correcto de los recursos hídricos disponibles, garantizando un desarrollo que sea sostenible en relación con dichos recursos.

El proyecto inició el 14 de Mayo de 1997 y se ha concluido en Febrero 2000 con la entrega de los informes finales. Para la redacción de este informe, se han tomado en cuenta los datos disponibles al 30.09.1999.

2 PRINCIPALES LINEAMIENTOS SOCIO ECONÓMICOS GENERALES

Los datos presentados en este capítulo fueron tomados desde diferentes documentos oficiales de la República Dominicana (ver bibliografía), eventualmente puestos al día utilizando las tasas de crecimiento indicadas en los documentos mismos para cada tipología de datos.

La zona estudiada está dividida entre las provincias de: San Cristóbal, Monte Plata, San Pedro de Macorís, Hato Mayor, El Seibo, La Romana, La Altagracia y el Distrito Nacional. El entorno de Santo Domingo está excluido del estudio como indicado en los Términos de referencia, página 47.

El área de estudio comprende totalmente o parcialmente el territorio de los municipios de: San Cristóbal, Bajos de Haina, Sabana Grande de Palenque, San Gregorio de Yaguata, Nigua, Monte Plata, Bayaguana, Yamasá, Esperalvilla, San Pedro de Macorís, Los Llanos, Ramón Santana, Consuelo, Quisqueya, Hato Mayor del Rey, Santa Cruz del Seibo, La Romana, Guaymate, Salvaleón de Higüey, San Rafael del Yuma, La Otra Banda, La Laguna de Nisibón y el Distrito Nacional.

La población de estos municipios se estima hoy como indicado en la siguiente tabla:

Municipio	Habitantes
San Cristóbal	185,263
Bajos de Haina	111,080
Sabana Grande de Palenque	13,994
San Gregorio de Yaguata	37,276
Nigua	23,725
Monte Plata	42,316
Bayaguana	35,195
Yamasá	49,789
Esperalvilla	20,148
San Pedro de Macoris	167,816
Los Llanos	24,931
Ramón Santana	9,073
Consuelo	25,664
Quisqueya	15,928
Hato Mayor del Rey	11,003
Santa Cruz del Seybo	22,351
La Romana	169,693
Guaymate	21,203
Salvaleón de Higüey	96,025
San Rafael del Yuma	20,463
La Otra Banda	10,167
La Laguna de Nisibón	5,942
Distrito Nacional	237,542

La población total de estos 23 municipios se estima hoy en 1,356,586 habitantes de los cuales 624,030 (46%) viven en zonas rurales y 732,556 (54%) en áreas urbanas. De éstos, el 48.6% son hombres y el 51.4% mujeres.

Por lo que atañe a la instrucción, el nivel de alfabetismo se divide así por municipio:

Municipio	% analfabetos
San Cristóbal	20.4
Bajos de Haina	16.6
Sabana Grande de Palenque	20.0
San Gregorio de Yaguatae	25.8
Nigua	21.6
Monte Plata	29.2
Bayaguana	28.3
Yamasá	32.0
Esperalvilla	31.2
San Pedro de Macoris	14.8
Los Llanos	28.8
Ramón Santana	30.3
Consuelo	19.3
Quisqueya	20.6
Hato Mayor del Rey	25.5
Santa Cruz del Seybo	30.8
La Romana	14.4
Guaymate	32.1
Salvaleón de Higüey	22.4
San Rafael del Yuma	31.4
La Otra Banda	29.9
La Laguna de Nisibón	27.9
Distrito Nacional	13.3

La tasa media de analfabetismo se calcula en un 20.1%.

La población económicamente activa representa el 36.0 % de la población total. La repartición en porcentaje de las categorías ocupacionales está indicada a continuación.

Categoría ocupacional	Repartición en %
Patrón o empleador	6.2
Trabajador por propia cuenta	20.7
Trabajador servicio doméstico del hogar	2.3
Trabajador asalariado	68.6
Trabajador familiar no pagado	2.2

La importancia de las diferentes actividades productivas y de servicios en el área (calculada tomando como parámetro de referencia el número de ocupados por cada sector), puede ser así definida, en orden decreciente:

Actividades productivas	Incidencia en %
Industrias manufactureras	29.90
Servicios comunales, sociales y personales	18.92
Agricultura, silvicultura	16.68

Comercio y turismo	14.05
Construcción	6.87
Transporte y telecomunicaciones	5.43
Estab. financieros, seguros, bienes, inmuebles y servicios prestados a las empresas	1.94
Pesca	0.70
Electricidad, gas y agua	0.67
Explotación de minas y canteras	0.09
Otro	4.76

Pese a que el turismo en estos últimos años haya crecido mucho en el área (donde se encuentran las localidades turísticas más conocidas y frecuentadas de toda la costa del Caribe), las actividades industriales, agrícola-ganaderas y de los servicios se encuentran en las primeras tres posiciones por importancia como fuente de ocupación.

A continuación se indican por cada área de producción los productos/características principales por provincia.

Área industrial

Excluyendo el entorno de Santo Domingo no incluido en la zona de estudio, la gran mayoría de las industrias se concentran en las zonas francas tanto privadas como públicas.

En el territorio de las provincias incluido en el área del proyecto, las principales producciones industriales son las siguientes:

<i>Provincia</i>	<i>Sector productivo industrial</i>
San Cristóbal	Textil, Química y Electrónica (en zonas francas privadas), Textil (en zonas francas públicas), Química, Alimenticia y Agregados y materiales para la construcción (industrias privadas y/o públicas).
Distrito Nacional	Textil y Electrónica (en zonas francas privadas), Química, Alimenticia y Agregados y materiales para la construcción (industrias privadas).
Monte Plata	Textil (en zonas francas públicas).
San Pedro de Macorís	Textil, (en zonas francas privadas y públicas), Química, Alimenticia y Agregados y materiales para la construcción (industrias privadas y/o públicas).
Hato Mayor	Ninguna producción industrial en el área de estudio.
El Seibo	No hay actividades industriales relevantes.
La Romana	Textil, (en zonas francas privadas), Alimenticia y Agregados y materiales para la construcción (industrias privadas y/o públicas).

La Altagracia Textil, (en zonas francas públicas), Alimenticia (industrias privadas y/o públicas).

Área agrícola y ganadera

En el territorio de las provincias incluido en el área del proyecto, las principales producciones son las siguientes:

<i>Provincia</i>	<i>Productos agrícolas y ganaderos</i>
San Cristóbal	Agrícolas: Caña de azúcar, Yuca, Tomates, Guandules y Naranjas Ganaderos: Aves, Caprino
Distrito Nacional	Agrícolas: Caña de azúcar Ganaderos: Aves, Porcino, Vacuno
Monte Plata	Agrícolas: Caña de azúcar Ganaderos: Vacuno
San Pedro de Macorís	Agrícolas: Caña de azúcar Ganaderos: Actividad no muy desarrollada
Hato Mayor	Agrícolas: Caña de azúcar y Toronjas Ganaderos: Vacuno
El Seibo	Agrícolas: Caña de azúcar Ganaderos: Vacuno
La Romana	Agrícolas: Caña de azúcar Ganaderos: Actividad no muy desarrollada
La Altagracia	Agrícolas: Caña de azúcar y cultivo mixto. Ganaderos: Vacuno

Área de la pesca

No existe una actividad pesquera desarrollada y organizada a nivel industrial. Sólo existe la pesca de bajura con barcos pequeños a distancias no muy grandes de la costa. Los productos principales son moluscos (lambí), crustáceos (cangrejo, langosta y camarones), pescado de arrecife (mayormente chillo, dorado, carité, machuelo, cojinúa y tiburón). En algunos ríos se pescan lisas y tilapias.

Área turística

El turismo está muy desarrollado en la costa donde se encuentran hoteles y restaurantes en cantidad elevada. Los centros turísticos principales son, de Oeste a Este: Boca Chica, Juan Dolio, La Romana, Bayahibe, Punta Cana, Bávaro-El Cortecito.

Por lo que atañe al turismo ambiental, existen el Parque Nacional del Este (península de la

Granchorra e isla Saona) y el Parque Submarino de La Caleta cerca del Aeropuerto de Las Américas.

Área minera / extractiva

A parte de la extracción de arena y grava para la construcción (esencialmente concentrada en el sector occidental del área de estudio), las actividades en esta área son muy reducidas. Se extraen esencialmente Caliza (San Cristóbal y Distrito Nacional) Arcillas calcáreas (Distrito nacional, San Pedro de Macorís y Hato mayor), Arcillas industriales (Monte Plata).

Área de infraestructuras y servicios

La red de autopistas y carreteras, es de calidad media en el área. Hay una densidad bastante elevada en el Distrito Nacional y en San Cristóbal. Hay pocas carreteras en todo el sector al Este de la Capital.

En el área de estudio se encuentran 4 aeropuertos localizados en la zona costera Sur y Sudeste (San Isidro, Las Américas, La Romana, Punta Cana) y 3 puertos (Andrés de Boca Chica, San Pedro de Macorís y La Romana).

La distribución de electricidad es muy carente tanto en las áreas urbanas, como en las zonas rurales, donde el servicio no alcanza todos los pueblos.

El servicio telefónico es bueno, así como, en general, la cobertura celular.

3 CLIMATOLOGÍA

Para el desarrollo del análisis de las características climáticas del área, se tomaron en consideración los datos básicos medidos en 32 estaciones, a saber en:

- 15 estaciones pluviométricas/gráficas del INDRHI (período 1961-1996);
- 4 estaciones climatológicas del INDRHI (período 1967-1996);
- 9 estaciones climatológicas de la ONAMET (período 1961-1990 y año 1997);
- 4 estaciones pluviométricas del Central Romana (período 1964-1996).

Los datos climáticos básicos fueron facilitados en base temporal diaria (INDRHI, y Central Romana) y mensual (ONAMET) y necesitaron de una verificación y depuración larga y cuidadosa para llegar a una información confiable para los sucesivos análisis y elaboraciones.

Las características principales del clima se pueden así sintetizar (para mayores detalles, refiérase al Anexo Memorias n° 1):

- el promedio de lluvia anual es de 1370.9 mm, a nivel de estación los valores anuales medios oscilan entre 873 mm (La Romana) y 2688 mm (Presa de Isa, río Haina);
- el territorio de interés está caracterizado por una elevada variabilidad espacial y temporal de la precipitación y no hay correlación con la altura ni entre estaciones cercanas;
- la variación mensual de la precipitación presenta un régimen de tipo bimodal con época lluviosa en la primavera (en términos generales en el mes de mayo) y en verano-otoño (desde agosto hasta noviembre) y con sequía en el invierno y en junio-julio. Pero si la marcha intranual está bastante homogénea en todo el territorio examinado, los meses máximos y mínimos relativos tienen una elevada variabilidad de un lugar al otro, y también entre estaciones bastante cercanas;
- las áreas más lluviosas se localizan en las cuencas de los ríos Haina y Ozama y, en términos generales, en la Cordillera Central; las más secas a lo largo de la costa del Mar Caribe y en particular cerca de La Romana;
- se ha verificado, por las series históricas de la lluvia anual, como representativo a escala regional, el modelo logarítmico-normal por sus mejores resultados absolutos y relativos respecto a los modelos normal-Gauss y gamma-Pearson II (aplicación del test de χ^2 al nivel de significación del 95%);
- en la Planicie Costera Oriental, entre las cuencas de los ríos Haina y Anamuya incluidas, el coeficiente de variación CV de la lluvia total anual asume, en sentido estadístico, el mismo valor en toda el área, es decir CV = 0.243;
- la temperatura media del aire presenta valores anuales que fluctúan entre menos de 25 °C y más de 26 °C, la variación intranual de la temperatura media oscila entre 3 y 4 °C, y, en todo el área de estudio, el período de mayores temperaturas corresponde a los meses de julio a agosto y lo de mínima a los meses de enero y febrero;

- los valores de la evaporación de tanque A medidos oscilan entre 1482 mm (Naranjo de China) y 1775 mm (El Seibo), todos los meses presentan valores elevados de la evaporación. Debido reducido numero y heterogéneidad de los meses de medida completa de la evaporación, las medidas de evaporación utilizadas en el estudio, que en algunas estaciones llegan ciertamente a valores mensuales y anuales subestimados, tienen el sentido de indicación de la magnitud del fenómeno y, sobre todo, de su marcha.
- la ecuación de Hergreaves-Samani ha sido elegida como método de referencia para evaluar la evapotranspiración potencial ETPo por que tiene, a escala de toda el área de estudio del Caribe, el mejor ajuste, en sentido relativo, con la marcha mensual de los valores de la evaporación de tanque A (EPan). Todavía a escala local pueden tener más validez otros métodos, como por ejemplo eso de Turc y/o de Blaney-Criddle.
- la distribución de la ETPo anual tiene una cierta correlación con las características morfológicas, el promedio anual es de 1669.4 mm, a nivel de estación los valores anuales medios oscilan entre 1560 mm (Naranjo de China) y 1970 mm (La Romana);
- el balance entre la precipitación media anual y la ETPo (de Hergreaves-Samani) llega a encontrar las áreas más secas, donde se señala un déficit hídrico alrededor de todo el año, en las zonas costeras alrededor de la ciudad de La Romana. En cambio, las áreas húmedas se encuentran en las zonas intramontanas y de sierra, ocurriendo los períodos húmedos más largos, hasta 5-7 meses, en las cuencas de los ríos Haina, Nigua y Ozama.

4 OROGRAFÍA , HIDROGRAFÍA Y GEOMORFOLOGÍA

La Planicie Costera Oriental, entre las de estudio, es el área de mayor extensión con un ancho de unos 200 kilómetros. Se extiende desde el río Nizao, en la extremidad O a lo largo del límite con el sector de Baní, hacia el Canal de la Mona, que divide la República Dominicana al E de la isla de Puerto Rico. En dirección NS, el área de estudio se extiende desde el mar Caribe, al S, y las áreas montañosas de la Cordillera Oriental, al N.

Ella representa un área de morfología plano-ondulada afectada hacia el mar por una serie de escarpaduras de erosión de distintos órdenes, con cotas de pie variables entre 10 y 40 metros, consiguientes a varias fases de descenso del nivel eustático.

En la zona comprendida entre Bayahibe y, aproximadamente, la Laguna de Hoyo Claro están presentes también numerosas escarpaduras de origen tectónico que determinan, en caso de intersección, evidentes dislocaciones en los bordes de las terrazas de erosión.

El variado nivel de base ha inducido una intensa acción erosiva de los ríos presentes en el área, que en aquéllos comprendidos entre el río Higuamo y el río Yuma ha producido una quebrada que caracteriza buena parte de los trechos terminales de los cursos de estos ríos.

Desde el punto de vista del pattern hidrográfico dichos ríos muestran un típico retículo dendrítico de baja densidad con organización jerárquica casi inmediata diferente del irregular, a veces meandriforme, de los ríos de la parte oriental para los cuales se observa el desarrollo de cauces más bien amplios como testimonio de una mayor erosionabilidad de los terrenos.

A lo largo de toda la Planicie se observa el desarrollo de una difundida fenomenología kárstica que se manifiesta a través de formas superficiales como barrancos, aislados o en campos, y formas menores como Karren, Hoyos y Hendiduras kársticas.

Formas kársticas de mayores dimensiones (uvala) resultan menos frecuentes y se observan predominantemente en proximidad de Boca De Yuma, en el área de El Salado, en la depresión de Pantanal y al N de Boca Chica.

Se observan frecuentes sumideros, siempre en proximidad de Boca Chica, en correspondencia de la pequeña escarpadura, presente de manera que se la distingue a una decena de kilómetros de la costa, y se la observa entre el límite oriental de Santo Domingo y el pequeño pueblo de El Tintero. Esta escarpadura forma en su desarrollo una bien distinguida barrera morfológica para el flujo hídrico superficial.

Otros sumideros son los que determinan la desaparición del río Yautia en el borde de la cuenca cuaternaria al este de Higüey, y del Arroyo Arenitt en Los Sumideros.

En sentido general, un karstismo evidente y bien reconocible, aunque no es continuo, está presente en toda la franja costera, de pertinencia de las facies calcáreas bioconstruidas, entre Santo Domingo y el río Cumayasa; en esta franja la zona de mayor intensidad de la fenomenología kárstica es la que se desarrolla a partir de la escarpadura arriba mencionada Santo Domingo-El Tintero, en dirección de la costa.

Al este del río Chavón, el karstismo se vuelve nuevamente muy intenso y reviste probablemente un carácter de continuidad, por un área muy extensa, hasta la línea que une El Salado con Boca Cachón; la incertidumbre sobre la continuidad del fenómeno se debe a la extensa cobertura de bosque que caracteriza estas zonas, inaccesibles, y no permite el reconocimiento de todas las formas kársticas, a no ser aquéllas, de dimensiones mayores, visibles de foto aérea. En dicha área es bien evidente el vínculo entre las formas del karstismo y los elementos de la neotectónica cuaternaria, esta última

particularmente activa en esta zona.

Fracciones menores de intensa karstificación están presentes también al S de la Laguna de Bavaro y a lo largo de la ramificación N del área de estudio.

En las zonas más internas de la Planicie están presentes, predominantemente en correspondencia de las calizas retroarrecifales, unos campos constituidos por pequeñas cuencas cerradas, a veces rellenas con agua, posiblemente originada por la presencia sub-superficial de cavidades kársticas de disolución o de derrumbe.

Mayor probabilidad de origen kárstico de estas formas se tiene en los depósitos, hipotetizados como terrígenos, de la llanura al SE de la ciudad de Higüey; en los bordes relevados de la llanura se observan en alineamiento numerosas dolinas, mientras que en las zonas internas, en los sectores de presunto menor espesor de los depósitos (o de mayor intensidad de los fenómenos kársticos), además de las cuencas cerradas descritas anteriormente, están presentes también formas deprimidas de mayor desarrollo que pueden atribuirse con mayor certidumbre a una fenomenología kárstica.

Entre los grandes ríos de la República Dominicana, algunos de ellos se encuentran en el área de la Planicie Costera Oriental.

Todos los que se encuentran al SO de la ciudad de Salvaleón de Higüey (desde el río Duey-Yuma hasta el río Nizao) tienen su curso principalmente en dirección N-S saliendo al mar Caribe. La parte restante de la provincia de La Altagracia, al E y al N de la ciudad de Higüey, se caracteriza por una red de drenaje no muy importante (en términos de extensión areal), con marchas SO-NE.

Desde el O, se encuentran en sucesión:

- *Río Nizao*; a lo largo del límite O, este río divide el área de estudio de la de Baní (ver también el capítulo sobre el área de Baní - Memoria 2). Trátase de un río cuyo régimen está distorsionado por los embalses aguas arriba (Jigüey, Aguacate, Valdesia, Las Barrías).
- *Río Nigua*; presenta un trecho muy breve, pero no obstante esto desarrolla un valle bastante amplio, que alcanza las dimensiones mayores en correspondencia de San Cristóbal. En el trecho terminal el valle se estrecha y el río, que presenta una marcha marcadamente meandriforme, resulta confinado lateralmente por vertientes de alta escarpadura.
- *Río Haina*; inmediatamente al O de la ciudad de Santo Domingo; está incluido en el área investigada sólo por la parte mediana de su curso, que corre encauzado en los relieves volcánicos hasta la Loma La Lechoza, para desarrollar luego una extensa llanura pantanosa que caracteriza a todo el trecho terminal.
- *Río Ozama*; es el río más importante de toda la región y presenta una cuenca hidrográfica muy amplia que, desde los relieves de la Cordillera, recoge las aguas del sector que va desde Los Alcarrizos a Yuvina.

Los principales afluentes del Ozama son constituidos por los ríos Isabela y Yabacao que representan importantes segmentos fluviales escurrientes en sub-cuencas de tamaño apreciable.

En el desarrollo del retículo hidrográfico en la Planicie resalta la ausencia de salidas al mar de ríos, aunque modestos, en el trecho costero entre la desembocadura del río Ozama y el río Higuamo. Los ríos presentes en el interior de esta franja, de los cuales el más importante es el río Brujuelas, tienden a desaparecer en los sumideros que se observan en el pasaje entre los terrenos carbonáticos internos y las calizas bioconstruidas

de alta karstificación de la franja costera.

- *Ríos Higuamo, Soco, Cumayasa, Dulce, Chavón*; estos ríos que se encuentran en sucesión desde el O hacia el E, tienen iguales características, presentando redes hidrográficas bien encauzadas en los terrenos carbonáticos de la planicie, con profundidad de quebrada que depende, obviamente, tanto de la distancia de la desembocadura como de la posición respecto de las terrazas marinas costeras. Todos estos ríos presentan una buena organización jerárquica del retículo con desarrollo de geometrías generalmente dendríticas y sub-dendríticas.

La mayor irregularidad se observa en el río Higuamo que al N de la población de Angelina se ramifica en tres segmentos principales constituidos por el río Higuamo mismo, el río Casui y el río Magua, que aguas arriba de las respectivas confluencias desarrollan valles aluviales de amplitud sub-kilométrica. El Higuamo, que desemboca en el mar Caribe inmediatamente al O de la población de San Pedro de Macoris, presenta una desembocadura en estuario con formación de una estrecha ensenada costera que penetra hacia el interior por algunos kilómetros.

El río Soco, que lame en su trecho mediano la población de Ramón Santana, presenta un reducido desarrollo de depósitos aluviales, con zonas relativamente más extensas (algunos centenares de metros) al S de Ramón Santana y en la parte superior del curso.

El trazado del río Cumayasa corre cortando los terrenos de la llanura sin producir nunca un valle aluvial de tamaño significativo. La falta de un cojín aluvial caracteriza también al río Dulce, que en el trecho terminal atraviesa la población de La Romana.

El río Chavón, aun corriendo encauzado en los terrenos carbonáticos, presenta un modesto valle aluvial en su trecho final y una expansión del valle de amplitud mayor en un segmento de uno de sus tributarios, el río Sanate, donde es evidente en el desarrollo del valle la influencia ejercida por la presencia de una falla SO-NE.

- *Río Yuma*; este río, que en el trecho inicial toma el nombre de río Duey, corre hacia el S, pasando al lado de la ciudad de Salvaleón de Higüey y de la población de San Rafael de Yuma, hasta desembocar en el mar Caribe en correspondencia de la Bahía de Yuma.

A lo largo de su curso el río atraviesa, al S de Higüey, una amplia zona casi llana, extensamente cultivada, encontrando luego en el trecho terminal una escarpadura de origen tectónico que antes determina el desvío de su curso en dirección este y luego en el kilómetro final confina su corrimiento en una garganta muy estrecha.

- *Río Anamuya*; el curso de este río atraviesa la llanura costera, pasando por el lado derecho de la carretera que desde el Cruce de los Isleños llega hasta Punta Macao. La desembocadura del Anamuya está situada a pocos kilómetros al NO de la Punta Macao. El río no presenta un régimen perenne.
- *Río Maimón*; este río, encauzado en el trecho inicial entre relieves vulcano-sedimentarios, se expande en la llanura costera formando un amplio valle aluvial coalescente con aquéllos de los más meridionales Yonu y Duyey. El Maimón corre en dirección NE hasta empantanarse en correspondencia de El Anoncito, antes de alcanzar la Bahía de Maimón.

Cuencas lacustres y lagunas permanentes de extensión no despreciable se concentran en el extremo oriental del área de investigación, donde están presentes las dos lagunas costeras de Bavaro y Mala Punta y una cuenca no permanente de emersión de la capa hídrica (Laguna de Hoyo Claro), en la llanura de Pantanal.

Zonas de empantanamiento temporáneo están presentes de todos modos a lo largo de toda la franja costera al N del río Anamuya, hasta el vértice septentrional del área.

5 LINEAMIENTOS GEOLÓGICOS Y TECTÓNICOS

5.1 Geología

La zona de estudio está caracterizada desde un punto de vista geológico por la presencia de vastos depósitos carbonáticos arrecifales, limitados hacia arriba por los relieves, de naturaleza predominantemente magmática, de la Cordillera Central y de la Cordillera Oriental.

Depósitos cuaternarios de origen terrígeno están presentes sea en forma de cojines aluviales de los principales ríos del sector occidental, que como depósitos lacustres y fluvio-lacustres, estos últimos particularmente extensos en el sector de Monte Plata y de Higüey.

En la zona de estudio están incluidos sólo marginalmente los terrenos clásticos mesozoico-cuaternarios característicos del área de Baní.

Secuencia vulcano-sedimentaria cretáceo paleogénica

Los relieves internos que limitan a la zona de la Planicie Costera Oriental están constituidos por formaciones/unidades predominantemente volcánicas que pueden sintetizarse así:

- Metavulcanitas constituidas por espilitas, queratófiros y tobas, y menores metasedimentos representativos tanto de facies clásticas (metalutitas, metaarenitas y metaconglomerados) como de facies carbonáticas (*Formación Los Ranchos*);
- Esquistos de composición básica y ultrabásica de bajo grado de metamorfismo, metabasaltos y metapiroclastitas, con frecuentes intrusiones de naturaleza granitoide (*Complejo Duarte*);
- Secuencias esquistosas de naturaleza volcánica (de metabasaltos a metarriolitas) con subordinados niveles metasedimentarios (esquistos calcáreos, cuarcitas, conglomerados) (*Esquistos de Amina Maimón*);
- Basaltos y menores andesitas (*Formaciones Peravillo y Siete Cabezas*);
- Peridotitas serpentinizadas y menores basaltos oceánicos (*Peridotita de Loma Caribe*).

Tales distinciones no corresponden a las previstas por la leyenda de referencia, es decir la del “Mapa Geológico de la República Dominicana” en escala 1:250.000 de 1991; en ésta la mayor parte de las unidades arriba descritas está agrupada en una unidad geológica identificada con la sigla **k'mgm**.

Las únicas diferenciaciones previstas, efectuadas tanto sobre base litológica como sobre base cronológica, conciernen a los afloramientos calcáreos más extensos (**ki'c**, **ks'c**, **teo'c**), las secuencias marcadamente vulcano-sedimentarias (**ks'v-s**; **teo'v-s**), los cuerpos conglomeráticos (**ks'cg**) y los cuerpos intrusivos de quimismo ácido (**ks-tpg'to**), básico (**'g**) y ultrabásico (**'um**).

Se ha mantenido también la distinción de una franja en la cual los terrenos presentan una impresión metamórfica relativamente más intensa (**k'mgm-esv**) correspondiente a un metamorfismo de tipo regional en facies de esquistos verdes.

La unidad individualizada por la sigla **esq'v-s** identifica en cambio de manera unívoca a la formación *Amina Maimón Esquistos*.

Tales subdivisiones, aun no representando adecuadamente la compleja situación litoestratigráfica del área, cuyo estudio profundizado habría sido de todos modos extremadamente gravoso, deben considerarse sin embargo aceptables a los fines de la

evaluación de las características hidrogeológicas de estos terrenos.

Calizas arrecifales (tpl-qp'c)

La Planicie Costera Oriental está dominada arealmente por las facies calcáreas y calcáreo-terrágenas ligadas a la instauración, en edad cuaternaria, de una extensa plataforma carbonática limitada por arrecifes coralinos.

Desde un punto de vista cualitativo en los depósitos de la Planicie se observan facies diferentes que pueden remontarse a las diferentes unidades morfológicas que constituían el arrecife en el momento de su formación.

Desdichadamente, éstas se pueden distinguir sólo en grandes líneas, utilizando los métodos de la fotointerpretación y las verificaciones efectuadas en el terreno no podían seguramente permitir una zoneografía de detalle que habría necesitado un profundizado trabajo de terreno.

Las facies bioconstruidas, que constituían el núcleo del arrecife, se reconocen bien en proximidad de la zona costera, y se presentan generalmente o como biolititas masivas (framestone), de color variable del blanco al rosa claro, o como biolititas rosado-naranja (bindstone) de aspecto brechoide, ambas con frecuentes vacuolas y cavidades primarias.

Aun faltando una observación sistemática a lo largo de toda la franja costera del área de estudio, los depósitos arrecifales no resultan siempre continuos, mostrando a veces pasajes a facies altamente fosilíferas de “tipo Coquina”, con abundantes restos de gasterópodos, braquiópodos y lamelibranquios, como se ve bien en el cruce del río Chavón a lo largo de la carretera La Romana-Higüey.

El límite entre las biolititas y los depósitos retroarrecifales (backreef), de naturaleza predominantemente detrítica, representados, tanto en transición espacial como en sucesión vertical, por toda la gradación de los litotipos previstos en la clasificación de Dunham para los carbonatos alóctonos (mudstone, wackestone, packstone y grainstone), resulta bien distinguible sólo en la franja entre el sector E de Santo Domingo y San Pedro de Macoris, donde está individualizado por la presencia de una escarpadura morfológica y por la condensación de formas kársticas y sumideros.

En general los depósitos retroarrecifales tienen desarrollo areal muy extenso y tal extensión puede ser puesta en relación con la presencia de amplias lagunas internas originarias en las cuales, por falta de informaciones sobre las estratigrafía de los depósitos, es plausible prever una frecuencia mayor de mudstone (lodos micríticos) en posición distal respecto del núcleo del arrecife, y un incremento del componente terrígeno acercándose a los relieves.

Depósitos de difícil colocación en tal sistema son los representados por las calcarenitas de color crema, organizadas en estratos homogéneos y homométricos, observadas entre Punta Macao y la Laguna de Bavaro; naturaleza y aspecto de estos depósitos parecen indicativos de una facies distal de antearrecife, por cuanto la homogeneidad del sedimento parece más representativa de un ambiente de depósito litoral.

En el sector al SO de Santo Domingo, los terrenos presentes, aun habiendo sido asignados a esta unidad, muestran características diferentes de las facies típicas arrecifales presentes en los demás sectores de la Planicie. Como se dirá más ampliamente en el comentario de la zona de Baní, estos terrenos, constituidos por conglomerados, areniscas, siltitas de ambiente marino y calizas arrecifales, representan una alternancia de depósitos terrígenos y carbonáticos asignada, desde el punto de vista estratigráfico, a una distinta unidad pliocénica denominada *Formación del río Nizao*.

Esta formación se sumerge con suave inclinación por debajo de las calizas arrecifales aterrazadas presentes en la franja costera a partir, en dirección E, del río Haina.

Depósitos terrígenos cuaternarios

Depósitos terrígenos cuaternarios ('q) de vario origen están presentes en distintos sectores del área de investigación.

Las extensiones mayores de tales depósitos corresponden al área comprendida entre Monte Plata y el río Isabela donde se colocan, por una franja máxima de veinte kilómetros, entre los relieves volcánicos y los terrenos carbonáticos del sistema arrecifal.

Estos depósitos, con pocos afloramientos observables, resultan compuestos por materiales de origen fluvial y/o lacustre, de los cuales estos últimos son observables en proximidad del río Mijo.

En proximidad de los relieves aparecen depósitos de probable origen eluvio-coluvial.

En dirección SE, acercándose al límite con las calizas arrecifales, las estratigrafías de algunos sondeos indican la aparición, con frecuencia progresiva, de niveles calcáreo-detríticos, claramente emparentados con las facies calcáreas retroarrecifales.

No ha sido posible atribuir una causa a una tal articulación en la naturaleza de estos depósitos, principalmente, por la esporadicidad de los puntos de observación en el terreno y por la falta de elementos distinguibles en foto aérea.

A veces la extensa presencia de una cobertura arcillosa, probablemente residual, junto con la morfología casi llana del área, no permite ni siquiera la definición precisa de los límites con las adyacentes formaciones carbonáticas. Como confirmación de esta dificultad, también en el caso de afloramientos litoides se ha observado con frecuencia cómo la intensidad de la alteración ha resultado tan elevada que ha vuelto dificultoso, cuando no imposible, el reconocimiento del litotipo original.

La difusa presencia de esta extensa cobertura arcillosa, tanto en correspondencia de los depósitos cuaternarios como en los carbonáticos, encuentra confirmación además que en las observaciones en el terreno, también en las estratigrafías de algunos sondeos efectuados con anterioridad en el sector en cuestión; de tales estratigrafías resulta presente una cobertura de espesor variable de pocos metros a aproximadamente una decena. Dicha cobertura resulta particularmente desarrollada entre Los Llanos y los primeros relieves occidentales de la Cordillera Central.

En términos generales, las zonas progresivamente más internas resultan a menudo de difícil interpretación en la evaluación de la naturaleza de los depósitos, por causa de factores, a veces convergentes, como:

- Morfología casi llana con escasos afloramientos;
- Alteración intensa con frecuente desarrollo de coberturas, también espesas, de arcillas residuales;
- Extensas áreas cultivadas con caña de azúcar en las cuales la dificultad de observación está incrementada por el uso sistemático de detrito calcáreo en la formación del basamento de las calles de circulación interna.

Las verificaciones en las fracciones cuaternarias representadas en el ya mencionado "Mapa Geológico de la República Dominicana" de 1991, no ha confirmando su existencia relativamente a los señalados en las áreas de Ramón Santana, Guaymate/Lechuga y Quisqueya.

Con dudas se ha mantenido, en cambio, distinto como tal el depósito cuaternario ('q), ya definido así, presente al S y al E de la ciudad de Salvaleón de Higüey.

Faltando evidencias directas, las características morfológicas del área, extremadamente plana y delimitada por escarpaduras netas en los bordes sud-orientales, son tales que se puede considerar que en el origen esta zona estuviese caracterizada por la presencia de un paleolago, quizás de origen tectónico, cuyos depósitos, en parte mixtos a los fluviales originados por el PaleoYuma, constituirían el relleno.

Se debe subrayar, sin embargo, que dicha cobertura, si está presente, parece de todos modos de espesor reducido, por lo menos en aquellas partes en las cuales la presencia de formas kársticas subsuperficiales es claramente visible en foto aérea.

Depósitos de extensión menor están presentes en forma de depósitos arenosos litorales entre la Laguna de Bavaro y Punta Macao y de depósitos finos palustres en correspondencia de las Lagunas de Bavaro y Mala Punta y en las zonas palustres de la Bahía de Maimón, Punta Coco y Las Carderas.

Depósitos litorales finos, con desarrollo de vegetación (**qh'mr**) de tipo palustre se individualizan en una franja ubicada en el límite meridional de la península de la Granchorra.

Los principales depósitos aluviales actuales (**q'ha**) están desarrollados sólo en los cursos fluviales principales del sector occidental (Nizao, Haina, Nigua, Ozama) y en algunos cursos menores presentes en la ramificación nororiental del área de estudio (Maimón y Yonu); los ríos principales del sector mediano del área de estudio (Yuma, Chavón, Dulce, Cumayasa, Coco e Higuamo) tienen un curso predominantemente encauzado en los depósitos calcáreos de la Planicie y, cuando están presentes, desarrollan depósitos aluviales por franjas extremadamente estrechas, generalmente confinadas en las posiciones más internas.

En los depósitos aluviales de los ríos occidentales, se evidencia una granulometría de los sedimentos más bien gruesa (arenas y guijarros predominantes) en los ríos Nizao y Nigua, mientras que la predominancia de granulometrías muy finas, preponderantemente arcillosas, en los lechos de los ríos Haina, Ozama y sus tributarios es causa de la elevada turbiedad de las aguas fluviales y de la presencia de numerosas zonas de estancamiento en el cauce fluvial.

En la zona de expansión del valle los depósitos aluviales, coalescentes hacia abajo, de los ríos Maimón y Yonu, son predominantemente de tipo arenoso-limosos; el empantanamiento de estos ríos en proximidad de la costa prefigura una disminución hacia abajo en la granulometría de los depósitos hasta la transición completa a los sedimentos finos de tipo palustre de El Anoncito.

Depósitos cuaternarios más antiguos (**q'f**) se observan predominantemente en las partes altas de los valles.

Por falta de cobertura fotográfica, la delimitación del Cuaternario fluvial en el sector entre el río Isabela y San Cristóbal ha sido tomada, previa verificación de congruidad morfológica, de la cartografía geológica preexistente; esto podría presuponer que tal diferenciación entre **q'f** de esta área y **q'** de las zonas limítrofes resulte sólo formal por falta de un relevamiento del área adecuado a la escala de restitución de los mapas hidrogeológicos preparados en el presente trabajo.

Depósitos clásticos mesozoico cuaternarios

En el margen occidental, en proximidad del río Nizao, caen algunas fracciones de los terrenos flyshoides eo-miocénicos pertenecientes al Grupo del río Ocoa. Para los detalles sobre las características litoestratigráficas de las formaciones que lo componen (**teo'c**;

tols-tmim'm+car), vista la marginalidad en el área de estudio, se remite a las descripciones relativas al área de Baní.

Siempre en el margen occidental están presentes, entre el río Nizao y el río Haina, las formaciones pertenecientes al Grupo de Ingenio Caei.

Éste está constituido por una secuencia alternada de rocas terrígenas y carbonáticas sobrepuesta en discordancia con los terrenos del Grupo del río Ocoa.

En su interior se distinguen una formación basal, *Formación del río Nizao*, arenácea (**Tmim-s'Mm**) con episodios guijarrosos (**'Mm,cg**), y una formación superior, *Formación Ingenio Caei*, constituida por conglomerados, areniscas, siltitas de origen marino y calizas arrecifales (parte del **tpl-qp'c**, ver la descripción de las calizas arrecifales).

Con criterio análogo a aquél adoptado para el área de Baní, con referencia a la leyenda del mapa geológico 1:250.000, de todos modos se ha mantenido distinguido en la base de la formación un presunto nivel de granulometría fina (**tpl'm**), definido en la geología de referencia como margoso en facies litoral, que no habiendo sido observado en afloramiento resulta todavía dudoso sobre todo en la real extensión del mismo.

La parte alta de la secuencia se sumerge con suave inclinación por debajo de las calizas arrecifales aterrazadas y de los depósitos costeros litificados.

5.2 Tectónica

La zona de la Planicie no sufre de los efectos de la tectónica reciente a no ser sólo en el sector sudoccidental, donde se manifiesta como un sistema de fallas directas, de alto ángulo, orientadas según un trend predominante NO-SE.

La joven edad de estas estructuras está evidenciada por las dislocaciones producidas en las terrazas de erosión, también de orden inferior, como es visible en la depresión de Pantanal.

La tectónica precuaternaria puede observarse sólo en los terrenos del basamento cretáceo que constituyen los relieves montañosos marginales del área de estudio.

Sin entrar en el detalle de dicha tectónica decididamente compleja, cuyo análisis profundo no está previsto en los objetivos del presente trabajo, las unidades que constituyen la Cordillera Central y la Cordillera Oriental se desarrollan en sobreposición y/o yuxtaposición según franjas alargadas en dirección NO-SE, cuyas geometrías son consecuentes a la sucesión de por lo menos 8 principales fases tectónicas, que comprenden tres distintas fases cretáceo-eocénicas de vulcanismo y plutonismo de arco insular seguidas por igual número de fases de colisión del sistema de arco, a las cuales se agregan una fase eomiocénica de transurrencia a lo largo de fallas E-O que anticipa una fase transpresiva miocénica con interacción de las estructuras transcurrentes E-O con las más viejas estructuras NO-SE heredadas de la construcción del arco insular.

6 ACTIVIDADES DE CAMPO Y ESTUDIOS

6.1 Actividades preliminares

6.1.1 Colección de los datos y recopilación de antecedentes

Desde mediados de la década de los años sesenta hasta el presente, se han realizado en la República Dominicana, importantes trabajos de investigación en el ámbito de la geología, de la hidrología y de la hidrogeología. En este párrafo se sintetizan los principales que han interesado a todo el territorio nacional y a la Planicie Costera Oriental.

Información a nivel nacional

Plan Nacional de Investigación, Aprovechamiento y Control de Aguas Subterráneas (Planiacas)

Tahal Consulting Engineers Ltd/INDRHI, 1983

Es el trabajo más completo que se ha realizado a nivel nacional hasta la fecha, en el área de geología, hidrología e hidrogeología.

Su objetivo básico consistió en estudiar de manera sistemática los recursos hídricos de todo el territorio nacional y establecer las bases institucionales para su aprovechamiento.

En este estudio se dividió el país en catorce unidades hidrogeológicas (Tab. 1.1) y se llegó a la conclusión de que el volumen total de los recursos aprovechables se calculó en unos 1400 a 1500 millones de m³/año, de los cuales a la fecha se estaban explotando cerca de 250 millones de m³.

Entre otros logros se puede mencionar la actualización del mapa geológico general.

- El informe final está compuesto por siete volúmenes que afrontan las temáticas de calidad de aguas y efluentes existentes en la Rep. Dominicana;
- Glosario; instrucciones para completar los formularios de solicitud de informes detallados y de estadística descriptiva;
- Formularios de estación de la red;
- Decreto 217-91 (Plaguicidas);
- Notas de solicitud de información pertinente al diseño de la red;
- Planillas para estimar los factores de emisión de las industrias principales.

Planificación de la red pluviométrica de la República Dominicana

INDRHI/GTZ, 1990

Es un informe realizado por la misma misión de GTZ que tenía los objetivos siguientes:

- completar la red pluviométrica en todo el territorio nacional;
- definir los estudios específicos de precipitaciones regionales;
- elaborar una tentativa de programa de trabajo para los problemas hidrometeorológicos más relevantes.

En este informe se pone de manifiesto la existencia de 110 estaciones meteorológicas en todo el país, se recomienda la reinstalación de 19 de éstas y la construcción de otras 33 nuevas para obtener un total de 162.

Al final se presenta una serie de mapas con las regiones meteorológicas, de isolíneas de coeficiente de irregularidad, de estaciones pluviométricas, y un test de homogeneidad para todas las regiones meteorológicas.

Anuario Hidrológico 1988

INDRHI (Departamento de Hidrología), 1990

Consiste en la recopilación de datos hidrológicos en todo el país, para el año 1988 y consta de tres partes:

- Volumen I Aguas Superficiales;
- Volumen II Aguas Subterráneas;
- Volumen III Calidad de Aguas.

En el primer volumen se presenta la información climatológica y pluviométrica de la red del INDRHI, en el segundo se presenta la información hidrostática e hidrodinámica de la red de pozos de observación de la región sudoeste y en el tercero, se presentan los parámetros físico-químicos de las aguas del país.

Evolución en el Conocimiento de las Aguas Subterráneas en la República Dominicana

Ing. H. Rodríguez (CODIA), 1994

Consiste en un artículo que trata sobre algunos trabajos que se han realizado en el país relativos a las aguas subterráneas desde mediados de la década de los años 60 hasta el año 1994.

En este trabajo también se pueden encontrar algunas consideraciones generales de la geología de la República Dominicana y conceptos generales de hidrogeología.

Optimización de los Recursos Hídricos de la Cuenca del Río Yaque del Sur y Mejoramiento de la Red Hidrométrica Nacional

PNUD/OMM - PROYECTO DOM/87/004, 1990

El presente informe trata sobre la concepción de la red hidrométrica nacional y fue editado en la fase final del proyecto cuyos objetivos principales fueron:

- fortalecimiento en el manejo y operación del sistema hídrico del río Yaque del Sur;
- establecimiento de una red hidrológica básica necesaria para la planificación futura de los recursos hídricos.

En el curso del proyecto se realizaron las siguientes actividades:

- análisis de la situación general de la red hidrológica nacional y de las prácticas de operación de la misma;
- estudio y análisis de la demanda actual y futura de la información hidrológica básica,
- diseño de la técnica de evaluación de la red hidrológica básica.
- diseño de la red hidrológica básica;
- construcción e instalación de 25 estaciones hidrométricas de primer orden.

Intensidades Máximas y Erosividad de las Lluvias en la República Dominicana

SEA/IICA/INDRHI, 1982

Es un documento dirigido a usuarios del sector agropecuario en el diseño de pequeñas estructuras para el control y conducción de lluvias y para la planificación del uso de las tierras donde se desea reducir el riesgo de erosión por las lluvias.

En dicho documento se presenta la información de lluvias procesada hasta el año 1980. En adición con anexos, se indican los procedimientos utilizados y una metodología convencional para estimar la escorrentía sobre la base de la información de intensidades de lluvias.

El trabajo consistió en el análisis y procesamiento de los datos de lluvia contenidos en las bandas de los pluviógrafos instalados en el país.

Los resultados presentan por cada evento de lluvia, la duración, el total de mm precipitados, sus intensidades máximas (de 15, 30, 60, 120, 240 y 360 minutos de duración) y, cuando la lluvia excede los 10 mm, su energía erosiva.

Distritos de riego de la República Dominicana

INDRHI. 1995

Consiste en una presentación ordenada de las características de los distritos de riego del país.

Fundamentalmente está constituido por tres partes principales:

- la primera presenta la estructura organizativa del Departamento de distritos de riego, con una descripción de las funciones y los cargos;
- la segunda recoge aspectos relevantes relacionados con ubicación geográfica, clima, suelo, uso agrícola e hidrología de los distritos de riego. Recoge también información vinculada con la infraestructura hidráulica para riego y drenaje, la superficie dominada y los cultivos principales;
- La tercera trata de la organización y participación de los usuarios en la administración de los sistemas de riego.

Situación hídrica de los sistemas cerrados en la República Dominicana

INDRHI, 1992

El objetivo de este trabajo fue estudiar las condiciones químicas de las aguas de los sistemas cerrados y su evolución en el tiempo por poder determinar los efectos de la acción antrópica.

Además se enfatizó en determinar la situación hídrica del Lago Enriquillo para la cual fue necesario conocer la morfología a través de un levantamiento hidrográfico.

Estos trabajos se planificaron sobre un mapa topográfico general a escala 1:50,000, en dicho mapa se determinaron los puntos de la red batimétrica y las distancias de cada sección de medidas.

El nivel del agua se determinó mediante una nivelación ordinaria y resultó ser de menos 43.29 m (3 de Junio de 1992).

La morfológica del fondo del lago resultó regular con la profundidad máxima de 22.53m, localizada en la parte Norte a una cota de -65.83 m.

Proyecto de Código de Agua para la República Dominicana

INDRHI - GTZ, 1990

Es un documento que está en proceso de aprobación en las Cámaras Legislativas, para fines de implementación en el territorio nacional.

Dicho documento se presenta en 13 capítulos con 358 artículos y en los cuales se indican todos los requerimientos legales para el uso de las aguas.

Los primeros cinco capítulos tratan del dominio de los recursos hídricos, del uso de las aguas públicas, de los derechos de uso y de los usos especiales de las aguas.

En los capítulos siguientes se trata de las aguas subterráneas, de obras hidráulicas, de la preservación de los recursos hídricos, de las penalidades, de los usuarios, de la autoridad de aplicación, del reconocimiento al uso establecido de las aguas y de las disposiciones finales y transitorias.

Información sobre el Inventario de las Estaciones Hidrológicas y Meteorológicas a Nivel Nacional

INDRHI - GTZ, 1988

Es un informe que consta de tres partes, en el cual están definidas todas las estaciones de aforos y, pluviométricas, con sus respectivas fotos.

Por cada una de las estaciones se presenta su situación con todos los datos necesarios y útiles para los diferentes usuarios.

Plan Nacional de Ordenamiento de los Recursos Hidráulicos (DIAGNÓSTICO)

OEA/INDRHI, 1994

Es un diagnóstico sobre la información hidroclimática disponible, realizado con los fines siguientes:

- definir los períodos de información posible;
- homogeneizar y establecer la confiabilidad de los datos;
- realizar los análisis necesarios para sentar las bases de selección de las series de datos utilizables en el ordenamiento de los recursos hidráulicos.

El informe se presenta en tres partes fundamentales:

- un diagnóstico de la situación existente en el año 1976;
- un informe hidrológico preliminar donde se ponen de manifiesto las características geográficas, climatológicas y la hidrología del país;
- la actualización y presupuesto de costos para proyectos de infraestructura de riego.

Inventario Nacional de los Recursos Hidráulicos Superficiales

INDRHI, 1990

Este trabajo tiene como objetivo principal la determinación de los volúmenes de los recursos hídricos superficiales y el potencial hidroeléctrico bruto de los ríos que conforman la red de drenaje de las cuencas hidrográficas del país que constituye un instrumento de planificación orientado a garantizar un control del uso de los recursos hídricos.

Fotografías Aéreas de la República Dominicana

Proyecto Marena N° 517-T-035 (USAID), 1983 - 1984

En el curso del proyecto se ejecutó, por zonas, la cobertura de todo el país con una serie de fotografías aéreas (escala 1:40,000) debidamente ordenadas y que está disponible en el banco de datos hidrogeológicos del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos.

Las zonas N° 3, 4 y 5 del proyecto MARENA cubren el área de EHN.

Información a nivel de la Planicie Costera Oriental

Hidrogeología, Aspectos generales Región Este

Tesis de Grado UNPHU, 1997

Es un trabajo de investigación, para ostentar por el título de ingenieros, realizado por bachilleres de la UNPHU, en el cual se presentan algunos datos hidrológicos recopilados por el Instituto Nacional de Acueductos y Alcantarillados (INAPA), referentes a los acueductos de las provincias de San Pedro de Macorís, La Romana y La Altagracia (Higüey).

Cantidad y Calidad del Agua Subterránea en el Acueducto de Santo Domingo

Tesis de Grado UNPHU, 1997

Es un trabajo de investigación, para ostentar por el título de ingeniero, realizado por bachilleres de la UNPHU, en el cual se presentan algunos datos hidrológicos recopilados por el Instituto Nacional de Acueductos y Alcantarillados (INAPA), en los campos de pozo de Mata Mamón, Los Marenos, La Catalina y La Joya.

Recopilación de Datos de Campos de Pozos del Este de Santo Domingo

INDRHI/GTZ, 1994

Es un informe que trata sobre la recopilación de datos hidrogeológicos de los campos de pozos de las comunidades de La Catalina, La Joya, Los Marenos y El Naranjo. Estos pozos son utilizados por la Corporación de Acueductos y Alcantarillado de Santo Domingo (CAASD), para el abastecimiento de aproximadamente el 25% del agua potable de la ciudad capital.

Desarrollo del Plan Maestro de Recursos Hidráulicos en la Vecindad de Santo Domingo

Boyle Engineering, Cornell Howland, Hayes & Merryfield, 1972

El informe presenta un plan maestro de desarrollo de Recursos Hidráulicos en la vecindad de la Ciudad de Santo Domingo, cuya finalidad fue la de satisfacer los requerimientos actuales y futuros de agua en dicha zona.

El plan fue desarrollado en tres fases:

- Fase I, la cual se realizó en dos partes: la Parte A, que fue un “Estudio Preliminar de los Recursos Hidráulicos” que incluyó investigaciones y análisis preliminares con el propósito de considerar todas las posibles fuentes de abastecimiento de agua; la Parte B, la cual se titula “Plan Maestro para el Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos en la Vecindad de Santo Domingo”, que incluyó investigaciones de ingeniería y análisis económicos con el fin de determinar la utilización óptima de recursos hidráulicos superficiales y subterráneos;
- Fase II, “Programa de Investigación y Aprovechamiento de Aguas Subterráneas”, por el cual se realizaron investigaciones en tres zonas para determinar la factibilidad de aprovechamiento de aguas subterráneas. Estas zonas se definen como las cuencas de los ríos Ozama-Yabacao y Brujuelas, Valle Superior del Río Haína y Cuenca Inferior del Río Nigua. El trabajo incluyó perforaciones de exploración del subsuelo, instalación de pozos de producción, de prueba y análisis de datos.
- Fase III, “Plan Maestro del Sistema de Distribución de Agua”, donde se formuló un plan para mejoras y expansión del sistema de distribución en Santo Domingo para satisfacer necesidades hasta el año 2000.

6.1.2 Inventario de puntos de agua

Las actividades de inventario se desarrollaron en forma esquemática en dos fases:

- Una primera fase (el inventario en su sentido más común), como primera actividad de campo del proyecto, antes de hacer los monitoreos piezométrico y de calidad de aguas.
- Una segunda fase, progresiva en el tiempo, en la cual se continuó añadiendo puntos de agua en el banco de datos cada vez que fuese necesario u oportuno.

Criterios utilizados en el inventario preliminar

El objetivo básico del inventario preliminar fue individualizar en el campo todos los puntos que tenían características tales que permitían poderlos utilizar en el tiempo como puntos de observación de la piezometría y/o de la calidad del agua, (incluyendo en estos últimos también aquéllos a utilizar para el control de la intrusión marina en las zonas costeras). Todo esto con el fin de conocimiento y estudio de los diferentes fenómenos, y de integrar y ampliar las redes de control existentes en las áreas de estudio.

Con este objetivo, el trabajo fue planificado y ejecutado de la manera siguiente:

- Trabajos preliminares:

- a) Consulta y recopilación de los datos existentes en bibliografía y en el banco de datos de INDRHI y de otros organismos.
- b) Identificación de los puntos de agua de las redes de control existentes.

- c) Redacción preliminar de fichas utilizando los datos disponibles.
- d) Ubicación en los mapas a escala 1:50.000 de estos puntos “bibliográficos”.

- Actividades de inventario en el campo, ejecutadas separadamente para cada zona:

- a) Verificación de los puntos de las redes de control monitoreadas por INDRHI.
- b) Verificación de los puntos “bibliográficos” y pesquisa de otros puntos existentes.
- c) Toma de informaciones generales sobre los puntos inventariados.
- d) Corrección de las fichas de los puntos “bibliográficos” en relación con la realidad encontrada en el terreno.
- e) Redacción de las fichas preliminares para los nuevos puntos.
- f) Ubicación en los mapas de todos los puntos inventariados.
- g) Ejecución, cuando fue posible, de las medidas de nivel piezométrico, de pH, de temperatura y de conductividad eléctrica

Conjuntamente a las actividades preliminares y a las de campo, se realizaron contactos estrechos con la oficina principal de INDRHI (Departamento de Hidrología) y con las unidades regionales de INDRHI de San Pedro de Macorís (responsable de la Planicie Costera Oriental).

Un componente de la brigada de monitoreo de la Oficina Regional Este (San Pedro de Macorís) de INDRHI, se integró a las actividades en el inicio del inventario, para facilitar el trabajo preliminar y la tarea de las brigadas de terreno, sobre todo por lo que atañe a la verificación de los puntos de las redes existentes.

En los términos de referencia, los puntos previstos para el inventario en la Planicie Costera Oriental eran 400.

En relación con la densidad de puntos prevista en la zona, con la realidad de terreno encontrada y con la diferente complejidad que los datos preliminares y los estudios existentes indicaban, se intentó cubrir el área de estudio con el número máximo de puntos con una distribución lo más uniforme posible y adecuada a las condiciones hidrogeológicas locales, a fin de poder permitir la constitución de una red de control lo más eficiente y representativa posible.

Los datos de los puntos inventariados se insertaron en el banco de datos del proyecto junto a un croquis de la situación y a dos fotos, una panorámica y una de detalle, según lo prescrito en los términos de referencia.

Tipología de los puntos añadidos durante las diferentes fases del proyecto

Durante el desarrollo del proyecto se continuó con la inserción de nuevos puntos de agua y con la adquisición de los datos relativos, según las necesidades de campo y las evidenciadas durante el desarrollo de las diferentes actividades del proyecto.

Los tipos de puntos que se añadieron fueron:

- Nuevos pozos/sondeos/manantiales en substitución de puntos de agua de control piezométrico y/o de calidad de aguas no utilizados.
- Los sondeos perforados en el proyecto.
- Los sondeos no incluidos en el inventario preliminar donde se ejecutaron ensayos de bombeo.
- Los pozos no incluidos en el inventario preliminar donde se instalaron contadores volumétricos.
- Los sondeos/pozos no incluidos en el inventario preliminar, utilizados para ejecutar

- perfiles de salinidad para el control de la intrusión marina.
- Los sondeos/pozos no incluidos en el inventario preliminar donde se hicieron muestreos para la potabilidad.
- Los manantiales no incluidos en el inventario preliminar donde se hicieron muestreos para las aguas minero-medicinales.
- Los sondeos/pozos no incluidos en el inventario preliminar donde se hicieron muestreos para los análisis isotópicos.

Al igual que para los puntos inventariados en la primera fase, también en lo que se refiere a estos puntos, todos los datos recogidos se insertaron en el banco de datos del proyecto con las mismas modalidades.

Resultados globales obtenidos en el inventario preliminar al monitoreo

El número total de puntos inventariados en esta zona fue de 540.

Por lo que atañe a la posible utilización de los puntos para las redes de control resultó que:

- el 12% de los puntos (66), eran aptos sólo para medidas piezométricas;
- el 19% de los puntos (100), eran aptos sólo para medidas de calidad de aguas;
- el 41% de los puntos (223), eran aptos para medidas piezométricas y de calidad de aguas al mismo tiempo.

Esto significa que:

- el 53% de los puntos inventariados (289), eran aptos para la red de control piezométrico;
- el 60% de los puntos inventariados (323), eran aptos para la red de control de calidad de aguas;
- el 28% de los puntos (151), no eran aptos, en las condiciones en las cuales los encontramos, para ser incluidos en las redes de control.

De todas maneras hay que tomar en cuenta que, a pesar del número elevado aparente de los puntos aptos para las dos redes, su repartición en el espacio y por categoría no siendo muy regular, un diseño de las redes no era de fácil ejecución.

Problemas encontrados

Los problemas que más afectaron a la ejecución del trabajo y que en el curso del proyecto ocasionaron dificultades en la elección de las redes de control, fueron:

- la falta de energía que no permitió tomar muestras en muchos pozos;
- muchas bombas existentes dañadas;
- en algunas zonas la mayoría de los pozos no tienen orificio para las medidas piezométricas;
- los pozos que tenían las características necesarias para ejecutar perfiles de salinidad eran muy raros;
- la imposibilidad que se presentó en muchos lugares de tomar muestras aunque sólo con el toma-muestra, por el hecho de que casi todos los pozos tienen bombas aunque fuera de funcionamiento;
- los molinos de viento, cuando no hay viento, no permitían tomar muestras directas de los pozos;
- el agua que se encontraba en los pozos hechos a mano estaba muchas veces cargada de material en suspensión que causaba dificultades en la filtración de las muestras para los análisis de laboratorio;
- la falta de colaboración de muchos dueños sobre todo en la parte turística más oriental y en la zona ganadera de Monte Plata;

- la localización de muchos pozos en la propiedad del Central Romana que causó problemas de acceso (resueltos después con una carta oficial del Director del INDRHI para que las brigadas de campo tuvieran libertad de circulación).

Cantidades finales y características principales de los puntos inventariados después de la inclusión progresiva de nuevos puntos

A la fecha los puntos totales incluidos en el inventario (y pues en la base de datos) son de 620 o sea el 55% más de lo previsto en los términos de referencia.

En la tabla 6.1.2/1, se reportan los detalles relativos a las características de los puntos de agua considerados. Entre otros, podemos indicar lo que sigue:

- La casi totalidad de los puntos de aguas existentes están representados por pozos (el 94.5%). Solamente 3 son manantiales.
- Entre los propietarios de los pozos, los más representados son los particulares (44.4%), INAPA (16.5%) y el CEA (8.1%). Los pozos/sondeos de INDRHI, incluyendo los sondeos realizados en el proyecto, representan el 4.8% de los inventariados. En 92 pozos (14.8%) no se pudo identificar al propietario.
- En los pozos que tienen equipos de bombeo, los tipos de bombas más representados son las eléctricas sumergibles (44.6%), las de eje vertical (19.8%), los molinos de viento (19.8%) y las manuales (11.0%).
- Los pozos se utilizan principalmente para uso doméstico (61.6%): entre las otras utilizaciones las más representadas son: riego (4.7%), industria (4.5%) y ganadería (4.0%).

El hecho de que el uso para fines turísticos no sea indicado no significa que no sea importante. Sencillamente los dueños de instalaciones turísticas no colaboraron en las fases de inventario, impidiendo en general la toma de datos.

- Las cotas de los pozos varían entre 1 y 120 m.s.n.m.
- Solamente en el 24% de los pozos se tienen datos (aunque estimados) de explotación anual.
- Los niveles estáticos medios (profundidad del agua desde la superficie) se sitúan alrededor de los 24 metros.
- El pH de las aguas se sitúa entre 6.4 y 8.7, con un promedio de 7.3.
- La temperatura de las aguas varía entre los 25 y los 30.4 grados Celsius con una promedio de 27.4 grados.
- Con referencia al número total de medidas ejecutadas, la conductividad eléctrica supera los 500 microSiemens/cm en el 80.6% de los casos, los 1000 microSiemens/cm en el 44% de los casos y los 3000 microSiemens/cm en el 14.1% de los casos.

6.2 Base de datos y Sistema de Información Geográfica (SIG)

6.2.1 Realización de una base de datos

Para la realización de la base de datos alfanumérica de manejo de los datos recopilados en el proyecto “ESTUDIO HIDROGEOLOGICO NACIONAL EN LA REPUBLICA DOMINICANA” se utilizó el DBMS *MSAccess97*. *MSAccess97* es uno de los más conocidos entre los database relacional comercializados en estos últimos años en las plataformas de tipo *Windows95-NT*.

Después de haber analizado las especificaciones técnicas del proyecto y de haber considerado los instrumentos a utilizar, la primera actividad fue el proyecto de la base de datos. Puesto que el database es tipo relacional, como primera acción se individuaron los atributos (datos) involucrados en el proyecto. Sucesivamente, mediante un proceso de normalización, se crearon las *entidades*.

La normalización es la técnica usada para controlar que cada atributo resulte asociado a la correcta entidad. La mejor representación utilizable para representar todas las entidades se denomina “*III forma normal*”. Después de haber definido las entidades se pasó a la creación de un modelo lógico “*Entidades-Relaciones*” y a la individuación de toda una serie de funciones e interfases a desarrollar en el interior de la base de datos de manera tal que el sistema resultase dotado de todas las funcionalidades de proyecto.

En la fase de realización se crearon las tablas (entidades) y las relaciones entre las distintas tablas; se individuaron luego aquellas tablas que tienen una referencia geográfica. Para estas últimas se creó un geo-código para el vínculo con el componente cartográfico numérico del GIS.

Se pasó luego a la realización de las fichas de interfase y de adquisición de datos. El código utilizado para el desarrollo de la BD y para la realización de las interfases es “*Visual Access*”. En *Visual Access* se realizaron también las interfases:

- con el modelo de las aguas subterráneas (*GMS*);
- con los programas de graficación de los datos químicos (*Hydrochem*);
- con el programa que dibuja las estratigrafías (*LogPlot97*).

En un segundo tiempo se llevó a cabo la revisión de las fichas de adquisición de datos, por indicación del cliente, y se implementaron algunos report para el manejo de las redes de control.

En el menú principal de la base de datos se introdujo también un botón que llama el ambiente de desarrollo estándar de *MSAccess97*. Mediante este ambiente, el usuario puede implementar nuevas funcionalidades o bien crear report y/o query. Se aconseja de todos modos el acceso a esta funcionalidad sólo a personal que tenga buen conocimiento del database *MSAccess97*.

Es posible acceder a la base de datos desde las computadoras del centro de elaboración conectadas en red. Habiéndola implementado para ser utilizada por usuarios múltiples, es posible operar en ella contemporáneamente, desde más de un lugar de trabajo. Para abrir la DB es necesario llamar el programa *MSAccess97* desde el menú de activación y sucesivamente, después de haber activado *Access*, es necesario abrir el file

“Sdomingo.mdb”.

En el start-up de la base de datos está visualizada una ficha que sirve como **“Menú principal”**. Mediante este menú es posible acceder a todas las funcionalidades implementadas en la base de datos. Para una descripción pormenorizada de las funciones y para la utilización de la base de datos hágase referencia al Anexo M1 (Manual de uso del BD hidrológico e hidrogeológico).

Otra recomendación importante se refiere a los salvatajes de la entera base de datos en unidades de backup externas. Periódicamente deberá salvarse el file **“Sdomingo.mdb”** de manera tal que eventuales daños de la base de datos no causen pérdidas de datos (este salvataje puede ser útil también en el caso de que sea necesario poner remedio a un daño del disco fijo de la computadora).

Si la introducción y/o la actualización de los datos se verifica en base diaria es aconsejable prever los siguientes salvatajes:

- **“diario”**, cada día de la semana efectuar un salvataje en disco magnético externo (uno por cada día de la semana);
- **“semanal”**, cada fin de semana, por todas las semanas del mes, efectuar un salvataje en disco magnético externo (uno por cada semana del mes);
- **“mensual”**, cada fin de mes, por todos los meses del año, efectuar un salvataje en disco magnético externo (uno por cada mes del año).

Se aconseja este tipo de salvataje, de todas maneras, no sólo para la base de datos alfanumérica, sino también para todas las demás tipologías que deben actualizarse periódicamente. En el caso en que, por motivos de cierre anómalo de la computadora (por ejemplo, corte de energía eléctrica), se dañe el database, *MSAccess97* posee una función de restablecimiento de la base de datos. En muchos casos esta función puede recuperar plenamente el database, es necesario recuperar el último salvataje efectuado y recomenzar a partir del mismo.

6.2.2 Implementación de un sistema de información geográfica

El sistema de información geográfica (GIS) del proyecto Santo Domingo ha sido desarrollado en ambiente ArcView en plataforma NT. Además del software aplicativo desarrollado a propósito para las exigencias del proyecto, el GIS dispone de las funciones estándar del ambiente ArcView.

Los archivos – llamados también coberturas cartográficas – de interés específico para el GIS son:

- Isohipsas: conjunto de las curvas de nivel digitalizadas;
- Mapas: conjunto de los subdirectorios relativos a los distintos tipos de cartografías temáticas a producir;
- Null.cuadro de unión a utilizar para aquellos tipos de cartografía que no lo requieren;
- Odb: archivo de las Views salvadas (porque son de interés para el usuario) en el formato ArcView;
- Themes: conjunto de las coberturas de fondo.

Las **funciones del programa** son aquéllas típicas de los GIS; se pueden resumir en visualización, manejo de datos espaciales y análisis espaciales. A estas funciones básicas

se les han añadido funcionalidades específicas que permiten efectuar:

- la producción de la cartografía del proyecto;
- la importación y la interrogación de datos presentes en la base de datos de S.Domingo;
- procedimientos varios de ayuda.

El GIS responde a las exigencias típicas de la producción de cartografía automatizando, en primer lugar, la producción de las cartografías temáticas previstas en las escalas 1:50000, 1:100000 y 1:250000. Al mismo tiempo, éste suministra al usuario todos los instrumentos para crear nuevos mapas, en las escalas mencionadas o en otras, usufructuando eventualmente los cuadros de unión existentes.

La producción de la cartografía del proyecto está ayudada por la presencia de botones específicos e interfases dedicados a la creación de mapas. Con procedimientos análogos, siempre con la ayuda de interfases amigables, se alimentan también eventuales views o tablas intermedias creadas durante la producción de cartografía en función:

- del cuadro de unión que se entiende utilizar;
- del área específica individuada en el interior del cuadro de unión;
- del layout particular dotado de leyenda, márgenes, marcos y demás detalles que se quieran introducir.

A través de las funcionalidades puestas a disposición por el GIS está prevista también la **creación automática de un nuevo tema**. Esta exigencia nace cada vez que, durante la ejecución de los trabajos, se desee utilizar un nuevo mapa para los objetivos del proyecto. Al lado de esta posibilidad está previsto también un procedimiento semi-automático donde el proceso de producción del mapa resulta ser menos inmediato para el usuario, el cual, en cambio, tiene un control mayor sobre la operación de plotaje.

Además de las posibilidades arriba mencionadas, el GIS permite también activar funciones relacionadas con **el agregado y la edición de nuevos símbolos** de leyenda a acoplar a la producción de las elaboraciones cartográficas. Con relación a esta posibilidad, el ambiente GIS dispone de un amplio surtido de posibilidades de acción que permiten importar nuevos símbolos, borrar algunos no utilizados, disponerlos a lo largo de arcos de polilíneas.

El agregado de nuevos símbolos prevé también la introducción de nuevos marcadores (símbolos puntuales) y de nuevos shades, a través de la integración, en el GIS, de las potencialidades ofrecidas por el instrumento CorelDraw particularmente apto para el dibujo y catalogación de nuevas formas gráficas.

Además de las funcionalidades expresadas anteriormente, que se refieren predominantemente a los aspectos de la cartografía y de la gráfica, el GIS dispone de funciones de integración y conexión con la **base de datos alfanumérica** de los puntos de agua, ampliamente utilizada en el curso del proyecto.

El usuario puede acceder a cada una de las tablas de la base de datos directamente desde el ambiente del GIS, accionando un botón específico de la interfase gráfica. La conexión con la BD puede llevar a la generación de nuevas coberturas cartográficas, a agregar a las preexistentes, a partir de aquellas tablas del data base en las cuales

resulten, entre otras, también las coordenadas cartográficas (longitud y latitud) que permiten georreferir, bajo la forma de primitiva puntual, los records generales de la tabla examinada.

6.3 Piezometría

6.3.1 Campañas piezométricas

Cantidades y metodología de elaboración de los datos

En los Términos de Referencia del contrato estaba previsto utilizar unos 250 puntos para el control piezométrico de esta área y ejecutar 24 campañas de medidas mensuales, reducidas a 17 después de la aprobación del Addendum n. 1.

En realidad se ejecutaron las 17 campañas mensuales desde Septiembre de 1997 hasta Octubre de 1998 y luego desde Junio hasta Agosto de 1999.

Vista la variabilidad y la inestabilidad previstas por el hecho de que la casi totalidad de los puntos existentes eran privados y no dedicados para el control piezométrico, se tomaron en cuenta para el monitoreo todos los puntos donde se podían hacer medidas de nivel piezométrico para poder definir al final de los dos años todos los puntos potencialmente utilizables en una red de control que a la vez fueran aptos técnicamente y confiables en términos de continuidad de las medidas en el tiempo.

Como núcleo inicial se tomaron en cuenta los puntos de la red “histórica” del INDRHI (para dar continuidad a las medidas) que ya tenían un mínimo de datos en tiempo pasado.

Con la llegada del huracán George y de sus consecuencias negativas a finales de Septiembre de 1998, después de la campaña de mediciones de campo en el siguiente mes de Octubre, donde se constató la disminución considerable de los puntos de medida (pozos fuera de servicio, acceso imposible etc...), se decidió interrumpir las medidas mensuales por 7 meses hasta que se pudiera regresar a una situación de normalidad. Las medidas se realizaron de nuevo por tres meses al final del período inicialmente previsto para poder definir la lista “definitiva” de los puntos aptos para la red y el diseño “final” de la misma.

En total se tomaron en cuenta 348 puntos (4551 medidas) de los cuales 319 (3500 medidas) antes del huracán y 277 (785 medidas) en los últimos tres meses de medidas (la diferencia de medidas se debe a la campaña de octubre de 1998 y a otras ocasiones específicas donde se necesitaban datos piezométricos para otras actividades).

Los puntos que se pudieron medir siempre en los trece meses antes del huracán y en los últimos tres meses (junio-agosto de 1999) fueron 236 o sea el 67.8% del total considerado. En los últimos 3 meses se añadieron 10 nuevos pozos de control más los 23 pozos nuevos perforados en esta área durante el proyecto.

En la tabla 6.3.1/1 se ilustran los detalles de la distribución de las medidas.

El número total de medidas ejecutadas en esta área (4551 contra un número previsto de 4250) fue de 301 superior a lo previsto (+7.1%).

El mapa de la piezometría observada se realizó a partir de los datos piezométricos medidos en la red del proyecto a lo largo de las 13 campañas anteriores al huracán George (9/97 - 9/98). Se evitó la utilización de cualquier método de regionalización semiautomático como el Kriging, considerando que en la mayoría de los casos la densidad de los datos no permitía alcanzar resultados satisfactorios y, más importante, porque estamos convencidos de que realmente se requiere una interpretación integrada y manual

de todos los datos disponibles (ej. papel de los ríos y de los canales, influencia de áreas de fuerte explotación).

El proceso de interpretación nos permitió localizar los datos anómalos, o sea los influenciados por bombeos o los relativos a niveles acuíferos menores, normalmente superficiales y no representativos. Estos datos fueron eliminados. Considerando que:

- las variaciones piezométricas observadas en el período son generalmente pequeñas (en general < 1m y mucho menos en la proximidad de los sectores costeros en acuíferos de alta transmisividad, como en el caso de la Planicie Costera Oriental),
- dichas variaciones generalmente se encuentran muy por debajo de los intervalos piezométricos utilizados entre dos isopiezas, decidimos utilizar datos medios.

En función de los gradientes observados, de la densidad de los datos disponibles y de la representatividad de estos a nivel regional, se distinguieron las isopiezas principales de las supuestas. Además en los sectores de interés específico (normalmente a lo largo de la costa, caracterizados por importantes fenómenos de intrusión salina) y donde los datos lo permitían, se diseñaron también isopiezas de detalle.

Una revisión de las interpretaciones, con relación solamente a los datos de pozos cuyas cotas y ubicación han sido determinadas por medio de técnicas Gps diferencial, ha evidenciado la existencia de diferencias apreciables en la proximidad de las áreas costeras y en las zonas con bajo gradiente. Por lo tanto la interpretación inicial se revisó y se modificó utilizando sólo estos últimos datos.

Metodología utilizada para el diseño de la red de control piezométrico

El objetivo de una red de control piezométrico es suministrar datos útiles al conocimiento de los fenómenos en acto asegurando contemporáneamente continuidad en el tiempo y confiabilidad/posibilidad de realización práctica de las medidas.

Las características de los puntos de la red deben ser:

- Distribución en el espacio y densidad adecuadas, en relación con los fenómenos a describir/monitorear, con los gradientes y con las variaciones piezométricas.
- Confiabilidad de los datos obtenidos (pozos sin bomba y lejos de pozos en explotación: solamente cuando no hay alternativas se pueden incluir pozos que no tengan estas características).
- Confiabilidad por lo que atañe a la continuidad de toma de medidas en el tiempo.
- Facilidad de acceso.
- Optimización entre número de puntos técnicamente aptos y número de puntos que en realidad se puedan monitorear con los recursos humanos y materiales disponibles.

Tomando en cuenta todo esto, el procedimiento adoptado para definir la red de control en cada área de estudio ha sido el siguiente:

- a) Selección de todos los puntos donde se pueden realizar medidas piezométricas y realización de éstas durante el tiempo previsto en el proyecto, añadiendo cuando sea necesario u oportuno, otros puntos nuevos en sustitución/integración de otros donde las medidas no se pueden realizar más.
- b) Reconstrucción de las isopiezas, donde sea posible (en relación con la existencia de puntos y la cantidad de medidas que se habían podido ejecutar en cada uno de ellos) según el procedimiento indicado más arriba en este mismo informe
- c) Estudio/interpretación de las mismas.
- d) Selección de los puntos donde se pudieron ejecutar medidas durante todos los meses de campañas piezométricas (que incluyen los pertenecientes a la red histórica de

- INDRHI) y depuración de aquéllos cuyas medidas habían sido afectadas significativamente por bombeos.
- e) Selección de los puntos nuevos añadidos durante las diferentes campañas que se pudieron medir hasta (o por lo menos en) Agosto de 1999 y depuración de aquéllos cuyas medidas habían sido afectadas significativamente por bombeos.
 - f) Selección de los pozos nuevos realizados en el proyecto después de Agosto de 1999 o que no se pudieron medir en los últimos tres meses por otras razones, pero que seguramente se podrán utilizar en futuro.
 - g) Reunir y poner en un mapa de trabajo los pozos de los puntos d), e) y f) evidenciando los que tienen bombas (instaladas aunque no en funcionamiento) que llamaremos “puntos aptos” a ser utilizados en la red de control.
 - h) Selección de aquéllos, entre los puntos aptos, que satisfacen los criterios indicados más arriba en este mismo párrafo y definición de la red de control.
 - i) Redacción de la parte relacionada con la piezometría del Mapa 2 – “Mapa de la red piezométrica y de aforos directos”.

En dicho mapa están indicados con apropiada simbología los puntos de la red de control que incluye el número (optimizado) de puntos que hay que continuar midiendo en el tiempo y, con otra simbología, los puntos no incluidos, pero “aptos” para el control piezométrico. Entre estos últimos eventualmente se podrán escoger soluciones alternativas, si es posible, para substituir puntos de la red que se tengan que eliminar.

El procedimiento utilizado, entre otras cosas, ha tomado en cuenta el hecho de minimizar al máximo la inestabilidad de la red de control evidenciada en el curso de las campañas de medida (ver Memorias finales – Anexos Generales – Anexo G3), incluyendo de preferencia en la red los pozos no utilizados y/o dedicados a este fin.

6.3.2 Determinación de las coordenadas plano-altimétricas de puntos de agua

La **campaña de mediciones mediante instrumental GPS** tenía por fin la determinación de las coordenadas plano-altimétricas de un cierto número de pozos, presentes en las 6 áreas de investigación, en los cuales se medía periódicamente el nivel de la piezometría. El sistema GPS, midiendo las distancias entre una antena receptora, ubicada en correspondencia del punto a medir, y un cierto número de satélites, y conociendo la posición de los mismos, efectúa una triangulación que permite obtener la posición del punto arriba citado.

Esta posición, empero, no es de utilización inmediata, por los siguientes motivos:

- 1) La medición está afectada por errores de distintos tipos, que hacen que a priori las indeterminaciones en las coordenadas del punto sean del orden de 100 m en planimetría y de 150 m en altimetría.
- 2) El sistema de referencia en el que la medición se efectúa es el propio del GPS, denominado WGS 84 (World Geodetic Datum de 1984). Por lo que atañe a la planimetría, las coordenadas obtenidas pueden distar varios centenares de metros de aquéllas de los sistemas locales presentes en los varios países. Por lo que atañe a la altimetría, la cota medida es la relativa al elipsoide de referencia, o sea al WGS 84, y no se trata pues de una cota sobre el nivel del mar, que, en cambio, es la que es habitualmente de interés.

Para solucionar el primer punto, fue necesario construir una red de medidas, utilizando un determinado número de receptores GPS (4, en nuestro caso), y manteniendo en todo caso uno o más receptores en puntos fijos, de los que se conociesen las coordenadas. De

tal manera, y utilizando software oportunos. es posible obtener a posterior una posición para los pozos caracterizada por una elevada precisión. Esto se verifica si están satisfechas las siguientes condiciones:

- Las coordenadas de los puntos conocidos deben ser conocidas con la máxima precisión posible en el mismo sistema de referencia en el que se efectúa la medición.
- La distancia entre los pozos y los puntos conocidos no debe superar un límite máximo, del orden de los 15-20 km.

En la República Dominicana no hay noticia de puntos de los que se conozcan las coordenadas en el sistema WGS 84. Existen sin embargo algunos puntos trigonométricos, instituidos por lo general en los años '50, que podían ser utilizados para nuestros fines; pero de ellos se conocen las coordenadas en el sistema local NAD 27 (North American Datum de 1927). Fue necesario, por lo tanto:

- Fijar arbitrariamente las coordenadas de un punto trigonométrico, convirtiendo sus coordenadas del sistema NAD 27 al WGS 84; en particular se eligió el punto de Haina, al Oeste de Santo Domingo, por su posición central en el ámbito de las 6 zonas de investigación.
- Construir una red GPS preliminar para determinar las coordenadas de otros puntos trigonométricos localizados en el territorio mediante una inspección preliminar. Se hace notar que el número de puntos utilizables resultó ser exiguo por distintos motivos, como por ejemplo la excesiva incomodidad o la imposibilidad de localización, o la imposibilidad de colocación de un aparato GPS en los mismos.

Los puntos trigonométricos utilizados en este área fueron Haina, Borda, Rufina, Macao y Sierra Prieta.

La utilización de un número tan exiguo de puntos no permitió satisfacer la condición de distancia máxima de los pozos de 15-20 km. Fue necesario, pues, instituir un cierto número de nuevos puntos de referencia, seleccionados siempre durante la fase preliminar de inspección, de modo tal que se encontraran en correspondencia de la mayor parte de los pozos. En particular, para la Planicie Costera Oriental, fueron seleccionados 9 nuevos puntos.

Por lo que atañe a la solución del punto 2) del que se ha tratado arriba, es necesario distinguir entre la conversión de las coordenadas planimétricas del sistema WGS 84 al NAD 27 y la conversión de la coordenada altimétrica de cota elipsóidica en el sistema WGS 84 a cota sobre el nivel del mar, o cota ortométrica. Utilizando los puntos trigonométricos arriba citados, de los cuales se conocían las coordenadas planimétricas en ambos sistemas de referencia, se calcularon, mediante oportunos algoritmos, los parámetros de la transformación que permitiesen pasar de un sistema al otro con la mínima indeterminación posible.

Viceversa, para la transformación de las cotas era necesaria la presencia de un "geoide", o sea de un modelo matemático que describiese la desviación entre las cotas elipsóidicas y las ortométricas en correspondencia de las áreas examinadas. Tal modelo, para el área del Caribe, fue calculado en los Estados Unidos por el NGS (National Geodetic Survey) y por la NIMA (National Imagery and Mapping Agency) y fue denominado CARIB 97, y se puede disponer de él gratuitamente. Tratándose de modelo matemático, éste debía ser "calibrado" localmente, para hacer corresponder las cotas obtenidas con verdaderas cotas

sobre el nivel del mar.

En la República Dominicana están presentes algunas líneas de nivelación, es decir líneas a lo largo de las cuales se pueden hallar puntos de los que se conoce con precisión la cota ortométrica. Estas líneas pertenecen por lo general a dos grupos, el primero instituido en los años '50, el segundo en los años '70. Desdichadamente no fue posible determinar cuál era el punto de referencia utilizado para definir la cota "0", o sea el nivel del mar propiamente dicho, ni si esta referencia era la misma para ambos grupos de líneas de nivelación.

Estas líneas, además, suelen estar instituidas a lo largo de las líneas de comunicación. A distancia de 20, o 40 años, obviamente casi todas las carreteras sufrieron fases de manutención, que en la mayoría de los casos llevaron a la destrucción de los puntos de nivelación. Esto hizo que aun disponiendo de aproximadamente 180 monografías, fuese posible localizar sólo 29 puntos, comprendiendo en tal número también aquéllos de los que se halló sólo el punto preciso en el que se encontraba, aun resultando removida o destruida la materialización.

Por último, de tales puntos no se conocía obviamente la coordenada en el sistema WGS 84, y ni siquiera aquélla en el NAD 27, dado que la monografía presenta sólo la distancia progresiva desde el comienzo de la línea. Fue necesario, por lo tanto, estacionar en ellos con un instrumento GPS a fin de determinar sus coordenadas. Esta actividad se llevó a cabo en la fase preliminar en la cual se definieron los puntos de referencia.

La campaña de medición propiamente dicha requirió aproximadamente 3 meses de trabajo por parte de 4 cuadrillas. Cada punto fue estacionado por un intervalo de tiempo comprendido entre 30 y 60 minutos, según su distancia desde el punto de referencia. El total de pozos medidos fue 517, de los cuales 291 para la Planicie Costera Oriental.

Muchos de éstos no se podían medir directamente mediante el instrumental GPS. La antena utilizada, para poder recibir las señales de los satélites en órbita, necesita una visual del cielo lo más posible libre, y esto no era posible a menudo por la presencia de cobertizos, muros, o vegetación. En este caso se seleccionaba un punto que permitiese la medición lo más cerca posible del pozo, del cual se medían la coordenadas mediante GPS. Contemporáneamente se medía la distancia y la dirección de la línea que unía ambos puntos, de manera que se pudiese sucesivamente obtener las coordenadas del pozo a partir de las del punto medido.

6.3.3 Levantamiento taquimétrico de puntos de agua

El levantamiento taquimétrico para la determinación de la cota de puntos de agua, se aplicó en algunos casos específicos, donde era importante una determinación precisa de la elevación de cada punto.

Esta metodología de determinación de la cota se aplicó para alcanzar dos objetivos principales:

- En sondeos pertenecientes a puntos de control de la salinidad (intrusión marina), se determinaron las cotas a fines de cálculo de la cota absoluta de la interfase agua dulce - agua salobre y de su gradiente.
- En sondeos cerca de ríos, se quiso comprobar las relaciones entre estos últimos y los acuíferos.

El levantamiento de las cotas se realizó en una campaña llevada a cabo entre Octubre y

Noviembre de 1999. Se utilizó una brigada de 4 personas formada por:

- . 1 agrimensor
- . 1 ingeniero hidrogeólogo
- . 1 ayudante
- . 1 chofer - ayudante

Las medidas se realizaron aplicando el método de la nivelación geométrica (nivelación compuesta a doble estadía), utilizando un nivel de precisión marca Wild NK2 con nivel basculante y dos estadías tipo libro de 4 metros. Las cotas absolutas se determinaron de preferencia con referencia a puntos de la red de nivelación nacional o a vértices trigonométricos nacionales. En caso de falta de éstos, se determinaron tomando como referencia la cota del mar en el punto más próximo.

Se determinaron las cotas de 16 puntos así repartidos:

- 13 puntos realizados para el control de la intrusión marina;
- 3 puntos para la relación río-acuífero. Para estos puntos se determinaron también las distancias entre ellos.

Los puntos interesados por el levantamiento fueron:

Objetivo intrusión marina

<i>Identificación del sondeo</i>	<i>Código del punto en el Banco de Datos</i>
Los Llanos 1	1898
Los Llanos 2	1897
Juan Dolio 1	1899
San Pedro 1	1892
San Pedro 3	1891
La Romana 1	1896
La Romana 2	1895
La Jarda 1	1884
Bávaro 1	1880
Bávaro 2	1879
Macao 1	1889
Macao 2	1888
Macao 3	1887

Objetivo relación río-acuífero

<i>Identificación del sondeo / punto</i>	<i>Código del punto en el Banco de datos</i>
Yabacao 1	1878
Yabacao 2	1877

Nivel del agua en el Río Yabacao en el punto más próximo al sondeo Yabacao 2.

Los resultados se introdujeron en el banco de datos y se tomaron en cuenta para las actividades de conceptualización hidrogeológica y para la modelización.

6.4 Hidroquímica e intrusión marina

6.4.1 Muestreo y análisis para la calidad de las aguas

Por lo que concierne a la red de control de la calidad, los requisitos indispensables para la inclusión de un pozo en la red de control son:

- características de realización del pozo adecuadas;
- accesibilidad;
- distancia relativa de los demás puntos de la red;
- distribución en el espacio en relación también con los acuíferos presentes;
- frecuencia de utilización;
- disponibilidad de un equipo de bombeo;
- posibilidad de toma de las muestras en las cercanías de la boca de pozo.

En el curso del año de observación en algunos casos faltó la disponibilidad del punto seleccionado, tanto por revocación de parte del propietario de la concesión de acceso, como por la imprevista imposibilidad de utilización del punto. En los límites de lo posible, se trató de sustituir los pozos que no era posible utilizar con otros con características similares ubicados en las inmediatas cercanías.

El número total de los puntos de la red de control de la calidad de las aguas subterráneas (221 puntos utilizados en la Planicie Costera Oriental) fue superior al preestablecido por los Términos de Referencia.

Su distribución está presentada en el mapa: “Mapa de caracterización hidroquímica de las aguas subterráneas” (Mapa 4).

Muestreo

La organización logística de la actividad de muestreo se valió de brigadas constituidas por dos personas equipadas de la siguiente manera:

- pHímetro y termómetro digital;
- Conductímetro de compensación de temperatura;
- kit de campo para la determinación de Bicarbonatos y Carbonatos;
- kit de campo para la determinación de Nitritos y Nitratos;
- equipo para la filtración del agua en filtros de 0,45 μm de porosidad;
- botellas de polietileno para la conservación de la muestra;
- HNO₃ para la conservación de la alícuota de muestra para el análisis de los cationes;
- freatómetro;
- termómetro para el aire.

Cada muestra fue identificada con un número de cinco cifras; las primeras cuatro tomadas del inventario: la primera cifra identifica el área de procedencia, las sucesivas tres el número progresivo del punto de agua; por último la quinta cifra es indicativa de la campaña de muestreo (1, 2, 3, 4).

Los resultados de las mediciones se anotaban tanto en las fichas de control como en los cuadernos de campo (Anexo Memoria6).

Los procedimientos de muestreo, de calibración y control periódico del instrumental de campo fueron estandarizados según los procedimientos indicados por “Standard Methods” [APHA, AWWA, WEF, Standard Methods 18th Edition, American Public Health Association, 1992].

Las muestras recolectadas por cada cuadrilla se almacenaban temporáneamente en la base logística de la que dependía la brigada, para ser enviadas luego, con cadencia semanal, a la sede de Aquater en la ciudad de S. Domingo.

En la sede de Aquater de S. Domingo se controlaba la integridad física y el número de los recipientes, además se redactaba el registro de las muestras para la transmisión al laboratorio.

Contextualmente, los datos de campo se controlaban y se introducían en el banco de datos.

Actividad de laboratorio

La transmisión de las muestras al laboratorio INDRHI se oficializaba mediante la toma en cargo de las aguas y de la copia del registro de las muestras, firmada por el responsable de Aquater y contrafirmada por la responsable del laboratorio, una vez cumplidos los procedimientos de control de la integridad de los recipientes y de la correspondencia de la numeración.

Los análisis requeridos y efectuados por el laboratorio son los siguientes (Anexo memoria 6):

- conductividad eléctrica específica;
- pH;
- bicarbonato;
- carbonato;
- cloruros;
- sulfatos;
- sodio;
- potasio;
- calcio;
- magnesio;
- amoníaco (en la última campaña).

Organización de los datos

Los resultados de las actividades analíticas relativas a la calidad de las aguas se organizaron en el banco de datos dividiéndolos entre análisis de campo y análisis de laboratorio.

Se pueden consultar los datos de campo utilizando los campos relativos a:

- n° de inventario del punto;
- n° de la campaña;
- datos de toma;
- datos relevados;
- tipología de análisis;

- descripción de la red de pertenencia.

Se pueden consultar los datos de laboratorio utilizando los campos relativos a:

n° de inventario del punto;
n° de la campaña;
fecha de muestreo;
datos analíticos.

Sobre la base de la organización descrita aquí es posible extraer las informaciones necesarias de vez en vez según las exigencias específicas del momento y, si es necesario, crear los files a destinar a la elaboración gráfica mediante el código de cálculo Hydrochem de Rockware, Golden Colorado (USA).

6.4.2 Muestreo y análisis isotópicas

En el curso del proyecto se han efectuado dos campañas de muestreo, por un total de 8 puntos seleccionados basándose en los siguientes principios:

tener un cuadro preliminar (primera campaña);
profundizar los conocimientos de los acuíferos, en particular utilizando las perforaciones efectuadas durante el proyecto (segunda campaña).

En la primera campaña (1998) se han considerado los pozos inventariados mayormente empleados para la extracción, en las muestras tomadas en esta fase se han determinado: Oxígeno-18 (O18), Deuterio (D) y Tritio (T).

En la segunda campaña (1999), sobre la base de los conocimientos hidrogeológicos adquiridos, se han considerado tanto los puntos de la red de calidad de las aguas como los pozos Aquater, perforados en acuíferos confinados y/o ubicados en zonas consideradas como estratégicas. En esta fase, además de las mismas determinaciones efectuadas en la fase anterior, en cinco se ha determinado también el Carbono-13 (C13) y Carbono -14 (C14).

La toma, la conservación de las muestras y las técnicas analíticas han sido realizadas en conformidad con las normas indicadas por la Agencia Internacional para la Energía Atómica de las Naciones Unidas [A.I.E.A., 1983. Guidebook on Nuclear Techniques in Hydrology. -Technical. Reports Series n° 91, Vienna, 439p].

Los análisis han sido efectuados en la República Federal de Alemania en el laboratorio Hydroisotop de Schweitenkirchen (Anexo 7).

6.4.3 Muestreo y análisis para la potabilidad

La investigación sobre la potabilidad de las aguas subterráneas en los sectores de estudio del proyecto está descrita con mayor detalle en el Anexo 8 (“Potabilidad de las aguas”), del cual el Mapa 6 (“Mapa de clasificación de la potabilidad de las aguas”) constituye la síntesis cartográfica de los resultados.

La evaluación de las características de potabilidad de las aguas subterráneas ha sido realizada específicamente a través de una campaña de toma y análisis de 40 aguas, 17

de las cuales dentro del área de la Planicie Costera Oriental, procedentes de pozos públicos, localizados en las áreas de estudio. Tales resultados fueron integrados con la reinterpretación, a fines de la utilización potable, de los datos relativos a las aguas de los 395 pozos pertenecientes a la Red de Calidad, de los cuales 247 ubicados dentro del área en cuestión.

Mientras que las 40 muestras tomadas expresamente para esta investigación han sido sometidas a una pormenorizada determinación de los parámetros químico-físicos y microbiológicos que determinan la idoneidad de las aguas naturales para el consumo humano, para la evaluación de los demás puntos hídricos se ha considerado un número de parámetros reducido y limitado a aquellas especies químicas, ya determinadas en el curso de las cuatro campañas de calidad, capaces de suministrar, aunque sea parcialmente, una indicación restringida sobre la potabilidad de las aguas.

Los parámetros sometidos a investigación en los puntos hídricos muestreados para esta investigación han sido los siguientes:

Parámetros microbiológicos

- Coliformes (Colibacilos totales)
- Coliformes fecales (Colibacilos fecales)
- Enterococos (Streptococos fecales)
- Microorganismos (Microorganismos aerobios mesófilos)

Parámetros químico-físicos

- Conductividad
- pH
- Turbiedad
- Residuo Fijo
- Cl
- SO₄
- NO₃
- NO₂
- Pb
- Ca
- Mg
- F
- P
- Fe total
- Cd
- Cr
- NH₄

Para los puntos hídricos pertenecientes a la red de calidad, monitoreados en el curso del proyecto por 4 distintas campañas de medición y análisis, entre las especies determinadas en dicho ámbito, han sido sometidas a un control de congruidad con los límites normativos de referencia los siguientes:

- Conductividad
- pH

- Residuo Fijo
- Cl
- SO₄
- NO₃
- NO₂
- Ca
- Mg
- NH₄

El muestreo específico para la determinación de potabilidad ha sido realizado en conformidad con todo lo prescrito en:

- UNICHIM “Metodi di campionamento per acque interne superficiali e sotterranee”, Manuale n. 144/85
- UNI EN ISO/ 5667-3, Qualità dell’acqua. Campionamento. Guida per la conservazione ed il mantenimento di campioni, Dicembre 1995
- UNI 10674 Acque destinate al consumo umano. Guida generale per determinazioni microbiologiche, Febbraio 1998
- EPA 600/(4-79-020), Methods for Chemical Analysis of Water and Wasts Federal Register, Sept. 3. 1987. 40 CFR Charpet1, Revised July 1.1988
- EPA 823 - B - 9, Water Quality Standards Handbook: Second Edition Appendixes, 1994

Las modalidades de toma de las muestras de pozos equipados con bomba han estado substancialmente ligadas al estado de la misma, es decir:

- Bomba in erogación continua. La muestra ha sido tomada directamente;
- Bomba instalada pero detenida. La erogación antes del muestreo se ha prolongado por un tiempo suficiente para el vaciamiento de las tuberías de enlace si la detención de la bomba había sido de breve duración, si al contrario, la detención de la bomba había sido superior a los tres días, el expurgo ha tenido una duración suficiente para la obtención de agua representativa del acuífero, eliminando, indicativamente, un volumen de agua equivalente a 3 veces el del pozo mismo.

Los análisis químico-físicos y bacteriológicos han requerido muestreos diferenciados tanto en las modalidades de toma como en la utilización de envases específicos.

Para las muestras de agua a enviar al laboratorio para los análisis químico-físicos las distintas alícuotas ha sido recogidas en envases de polietileno con tapón y contratapón herméticos. En el momento de la toma la muestra ha sido filtrada con una membrana con poros de 0.45 μm y limitadamente a las tomas de análisis destinadas a la determinación de los metales, acidificada con HNO₃ hasta pH 2.

Para la recolección de las muestras para análisis bacteriológicos se han utilizado envases estériles con contratapón y tapón de rosca. Ningún tratamiento ha sido efectuado en campo, salvo recoger las muestras utilizando guantes de látex descartables. Las muestras tomadas de esta manera han sido inmediatamente colocadas en frigorífico portátil y mantenidas a 4°C hasta la entrega al laboratorio analítico, ocurrida dentro de las 24 horas sucesivas desde el momento de la recolección.

Con relación a los parámetros químico-físicos, para la evaluación de la calidad potable de las aguas subterráneas en las áreas de estudio ha sido utilizado como referencia normativa lo prescrito por la OMS, en la emanación de 1993, siendo esta última difusamente adoptada como referencia en numerosas naciones que no poseen una normativa propia.

La toma de posición de no vincular el juicio de potabilidad a la normativa nacional vigente (NORDOM 64) está justificado por la subsistencia de límites, tan restrictivos como inapropiados para algunos de los parámetros considerados, que habrían determinado un juicio de no potabilidad para la casi totalidad de los puntos hídricos considerados.

Para los parámetros microbiológicos nos hemos referido en cambio sólo a la norma dominicana utilizando los límites fijados por las otras normativas solamente para fines comparativos.

El juicio expresado de esta manera sobre la potabilidad de las aguas expresamente tomadas para esta investigación, en el caso de comprometimiento sólo de los parámetros microbiológicos ha sido aplazado a un sucesivo muestreo y análisis de verificación, a realizarse previa cuidadosa esterilización preliminar de los pozos.

Las muestras de la red de calidad sometidas al juicio de permeabilidad reflejan, en cambio, en el caso de evaluación positiva, los límites obvios que derivan de un número incompleto de parámetros que no permite un juicio definitivo.

Estas muestras, analizadas en el curso de distintas campañas de toma y análisis, han sido evaluadas verificando la persistencia temporal de las condiciones de potabilidad de las aguas en los puntos hídricos considerados.

6.4.4 Muestreo y análisis para aguas minerales y minero-medicinales

En la Planicie Costera Oriental han resultado presentes dos manantiales con aguas de tipo minero-medicinal de cierto interés caracterizados por los siguientes códigos: 1571 y 1572; están localizados respectivamente en las localidades: Bayahibe (La Romana) y Los Tres Ojos (Sto. Domingo).

Como ya hemos descrito en el Anexo No. 9, los dos manantiales han sido muestreados en el curso del proyecto durante una campaña específica, para la determinación cualitativa desde el punto de vista químico y microbiológico, en conformidad con los métodos indicados en EPA 600/(4-79-020) (Methods for Chemical Analysis of Water and Wastes Federal Register, 1998) y EPA 823-B-9 (Water Quality Standards Handbook; Second Edition Appendixes, 1994).

En particular los análisis químico-físicos y bacteriológicos han requerido muestreos diferenciados tanto en las modalidades de toma como en la utilización de envases específicos.

Para las muestras de agua a enviar al laboratorio para los análisis químico-físicos las distintas alícuotas ha sido recogidas en envases de polietileno con tapón y contratapón herméticos. En el momento de la toma la muestra ha sido filtrada con una membrana con poros de 0.45 μm y limitadamente a las tomas de análisis destinadas a la determinación de los metales, acidificada con HNO_3 hasta pH 2.

Para la recolección de las muestras para análisis bacteriológicos se han utilizado envases estériles con contratapón y tapón de rosca. Ningún tratamiento ha sido efectuado en campo, salvo recoger las muestras utilizando guantes de látex descartables. Las muestras tomadas de esta manera han sido inmediatamente colocadas en frigorífico portátil y mantenidas a 4°C hasta la entrega al laboratorio analítico, ocurrida dentro de las 24 horas sucesivas desde el momento de la recolección.

En campo, en el momento de la toma se han determinado los valores de los siguientes parámetros:

- temperatura
- pH
- Conductividad
- Acido sulfhídrico disuelto
- Anhídrido Carbónico disuelto
- Bicarbonatos
- Carbonatos

En laboratorio para cada muestra se han determinado los parámetros microbiológicos y químicos enumerados a continuación:

Parámetros microbiológicos

- Recuento de Microorganismos aerobios mesófilos a 35°C
- Recuento de Coliformes (Colibacilos totales)
- Recuento de Coliformes fecales (Colibacilos fecales)
- Recuento de Enterococos (Streptococos fecales)
- Recuento de Anaerobios sulfito reductores
- Recuento de Estafilococos aureus
- Presencia de Pseudomonas aeruginosa

Parámetros químico-físicos

- pH
- Conductividad
- Turbiedad
- Cloruros
- Fluoruros
- Fósforo
- Nitritos
- Nitratos Amóniaco
- Sulfatos
- Residuo Fijo
- Alcalinidad Carbonática
- Alcalinidad Bicarbonática
- Calcio
- Manganeso
- Sodio
- Potasio
- Litio
- Estroncio
- Yodo
- Bromo
- Silicio
- Hierro
- Aluminio

Los datos analíticos de campo y de laboratorio están presentados en Anexo No 9.

6.4.5 Control de la salinidad y de la intrusión marina

Por lo que concierne a la red de control de la intrusión marina, son necesarios los siguientes requisitos:

- disposición a lo largo de directrices paralelas a la dirección de flujo;
- ausencia de equipos en el pozo que impidan el uso del instrumental de medición.
- características de realización del pozo adecuadas;
- accesibilidad;
- distancia relativa de los demás puntos de la red;

En este sector sólo 25 pozos han resultado idóneos para la ejecución de los perfiles verticales de salinidad.

Para la ejecución de los logs para la individualización de la interfase agua dulce agua salada se utilizó una sonda multiparamétrica Hydrolab DataSonde 4. La sonda estaba dotada de sensores para la determinación de:

profundidad (m, $\pm 0,3$ m, de 0 a 200 m)
conductividad eléctrica compensada a 25°C (mS/cm, 1%, de 0 a 100 mS/cm)
temperatura (°C, $\pm 0,01$ °C, de -5 a 50 °C)

Antes de comenzar cada perfil los operadores de campo seguían los procedimientos previstos por la empresa constructora para la verificación tanto de la calibración del instrumento como de la correcta funcionalidad de la parte electrónica.

Las mediciones se efectuaron en bajada respetando un tiempo mínimo de lectura de aproximadamente 1', para estabilizar el instrumento.

Los datos medidos se registraban tanto en el datalogger como en fichas apropiadas para garantizar la seguridad de la medición también en caso de avería del instrumento.

Organización de los datos

Los resultados de las actividades relativas a los perfiles de salinidad se organizaron en el banco de datos ilustrando:

- fecha;
- análisis de laboratorio;
- profundidad de la tabla de agua;
- temperatura del aire;
- temperatura del agua;
- conductividad eléctrica.

Se pueden consultar los datos de campo utilizando los campos relativos a:

- red de control de la intrusión marina;
- n° de inventario del punto.

6.5 Geofísica

6.5.1 Objetivos de las campañas geofísicas

El objetivo indicado en los Términos de Referencia era determinar los espesores de las formaciones acuíferas o de toda forma de interés hidrogeológico.

En la realidad, a parte de algunas excepciones representadas esencialmente por formaciones aluviales, los espesores de las formaciones de interés hidrogeológico presentes en el área de estudio son demasiado grandes para poder ser determinados con el tipo de prospección previsto. Se eligieron entonces objetivos de diferente naturaleza pero siempre de gran utilidad para los fines del estudio.

Se decidió estudiar de forma extensa el problema de la intrusión marina, tratando de definir la amplitud de las áreas de extensión de la misma y la profundidad del agua salada bajo la superficie (determinación de la interfase agua dulce-agua salobre).

En la zona de Monte Plata se intentó definir el contacto entre formaciones de origen volcánico y las calizas, por debajo de las coberturas aluviales existentes.

6.5.2 Cantidades previstas y ejecutadas

En el anexo E del contrato no estaba prevista una subdivisión por área de los sondeos previstos (para los detalles sobre cantidades totales previstas y cambios efectuados en relación con el cambio de objetivos, véase el Anexo 10).

Las cantidades ejecutadas en la Planicie Costera Oriental fueron las siguientes:

S.E.V. con AB = 150 m	196
S.E.V. con AB = 500 m	88
S.E.V. con AB = 1000 m	54
Total S.E.V. realizados	338

El trabajo se ejecutó en dos campañas (ver párrafo siguiente).

6.5.3 Metodologías de prospección y de interpretación utilizadas

Organización general de la prospección

La prospección geofísica fue realizada en dos campañas con el fin de poder determinar, con un período intermedio dedicado a la interpretación, si los objetivos iniciales podían ser alcanzados y para entonces permitir, ya sea intensificar las medidas donde fuera necesario, ya sea cambiar estrategia en caso de no definición del blanco requerido.

En la primera campaña realizada en el período Julio – Septiembre de 1998, se estudiaron las siguientes zonas:

- Zonas costeras desde Andrés de Boca Chica hasta La Romana.
- Area de Monte Plata 1 y de Monte Plata 2.

La segunda fase se inició a mediados del mes de Noviembre de 1998 y se acabó en Diciembre 1998.

Las áreas estudiadas en la segunda parte del trabajo fueron:

- Zonas costeras desde La Romana hasta La Vacama.
- Continuación/integración de la prospección en la zona desde Boca Chica hasta La Romana:

Metodología de prospección adoptada

Los métodos geofísicos de investigación tienen por objeto obtener información sobre las características de las formaciones geológicas del subsuelo por medio de la determinación de parámetros físicos obtenidos a través de observaciones y mediciones realizadas en la superficie del terreno (métodos indirectos de prospección).

En el presente estudio el método empleado fue el geoeléctrico (de resistividad).

Los métodos de prospección geoeléctrica se dividen en dos categorías:

- Los que utilizan una “señal natural” (campos eléctricos inducidos por diferentes factores naturales).
- Los que utilizan una “señal artificial” (se induce en el subsuelo un campo eléctrico con el envío de una corriente eléctrica por medio de una fuente de energización externa como baterías, generador...).

En este estudio se utilizó uno de los métodos del segundo tipo en su modalidad Sondeos Eléctricos Verticales, mediante el cual se pueden determinar las resistividades y los espesores de los diferentes estratos del subsuelo.

Principios y descripción del método utilizado

La metodología de prospección geoeléctrica adoptada estudia las modificaciones, dentro del subsuelo, del campo eléctrico inducido con una fuente de corriente continua, ocasionadas por las diferentes resistividades de las formaciones geológicas presentes y por la geometría de estas últimas.

La resistividad ρ de un cuerpo conductor eléctrico es definida como $\rho = \frac{1}{\sigma}$

donde con σ se indica la conductividad eléctrica, o sea la aptitud o capacidad del cuerpo de conducir la corriente eléctrica.

Los factores que determinan la resistividad de las diferentes capas en el subsuelo son esencialmente:

- La litología de las formaciones presentes.
- La presencia de agua (u otro fluido de imbibición).
- El contenido salino y la temperatura del agua.
- Los espesores y, de forma general, la geometría de las diferentes capas eléctricas en el subsuelo.

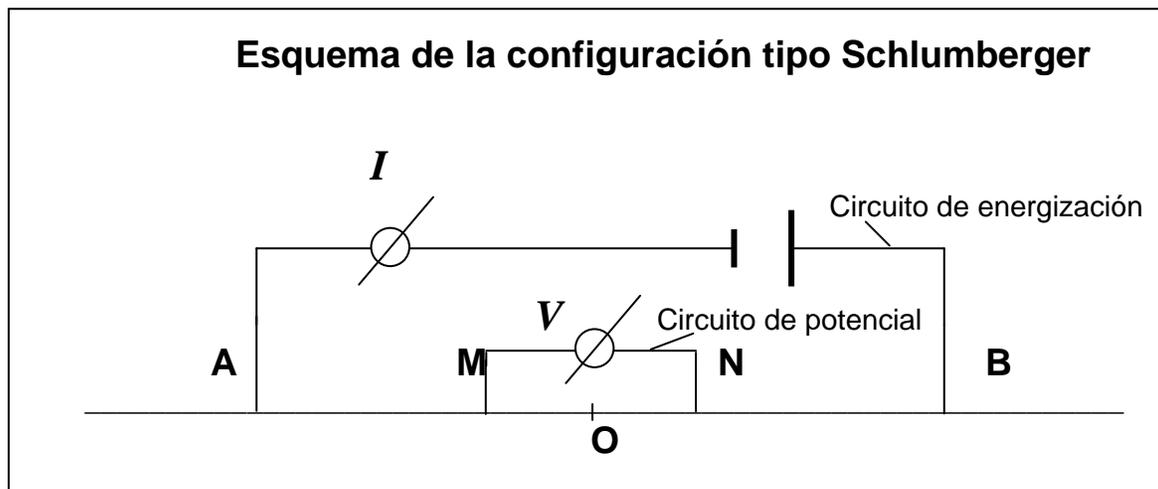
Estos factores hacen de este método una disciplina muy utilizada en el campo de la hidrogeología y de los problemas de intrusión marina.

Un aspecto muy importante a considerar es también el hecho de que, en la prospección y en la interpretación de los datos, hay una experiencia consolidada por más de 30 años de

actividad con muchos “case history” de referencia.

Obviamente, como cualquier tipo de prospección indirecta, es decir que no mide directamente el objeto de la investigación (mide solamente desde la superficie parámetros relacionados con el objeto mismo), necesita de una buena calibración para dar resultados confiables y representativos de la situación real (este aspecto es aún más importante si se consideran los problemas de “equivalencia”, es decir que diferentes situaciones del subsuelo pueden ocasionar la misma respuesta desde el punto de vista de los parámetros medidos).

Existen diferentes configuraciones electrónicas para la prospección geoelectrica. La más utilizada (adoptada también en el presente estudio) para la ejecución de los S.E.V. es la configuración cuadrielectrónica (arreglo) de tipo Schlumberger, representada esquemáticamente en la siguiente figura.



En los trabajos de campo, los parámetros que se miden son la intensidad de corriente I (poniendo un miliamperímetro en serie con el circuito de energización), la diferencia de potencial V (mediante un milivoltímetro puesto en paralelo al circuito de potencial) y las distancias entre los electrodos A, M, N, B utilizados.

El sondeo eléctrico vertical (S.E.V.) consiste en efectuar una serie de medidas dejando siempre el centro del dispositivo en un mismo punto “O” y aumentando sucesivamente la distancia AB, con el propósito de explorar siempre más en profundidad, hasta la profundidad deseada. Los electrodos A y B se llaman “electrodos de corriente” y los M y N “electrodos de potencial”.

Por cada posición sucesiva de A y B se puede así calcular la resistividad ρ con la fórmula siguiente:

$$\rho = K \frac{V}{I}$$

donde K representa la constante característica del arreglo, conocida como factor geométrico por ser función de la separación de los electrodos A, B, M y N y que se

calcula, por cada posición ABMN, de la forma siguiente:

$$K = \frac{2\Pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}}$$

Desde el punto de vista teórico, si el subsuelo fuera un medio homogéneo e isótropo, la resistividad ρ que se calcula de la forma arriba indicada, representaría la resistividad real del mismo medio.

En circunstancias reales, estamos muy lejos de esta condición. Entonces el parámetro que se mide tiene las dimensiones físicas de una resistividad, pero no representa la resistividad de ningún medio conductor. Este parámetro es función:

- de las resistividades reales de las capas que se encuentran en el volumen de terreno donde está presente el campo eléctrico inducido durante la energización,
- de la geometría (espesores, estructura geológica),
- de las deshomogeneidades de las mismas capas.

Este parámetro se llama “resistividad aparente” y se indica con ρ_a .

Colocando en un gráfico en las abscisas los valores de la semidistancia entre los electrodos AB ($AB/2$) y en las ordenadas la resistividad aparente (ρ_a) por cada posición sucesiva de los electrodos de corriente, se construye una curva que representa la función $\rho_a = f(AB/2)$ que se utiliza para la interpretación de los datos (ver párrafo 6.5.5 más abajo).

6.5.4 Equipos utilizados

El estudio geofísico fue conducido por dos brigadas cada una de ellas constituida por un geólogo-geofísico y dos ayudantes.

Los sondeos eléctricos fueron ejecutados con dos equipos diferentes: el primer equipo fue un PKE analógico fabricado en Polonia con escala de 1 a 3000 mV o mA; el segundo equipo fue un PASI digital fabricado en Italia con escala hasta 10000 mV y 3000 mA.

Fueron utilizados cables unipolares en acero y cobre para el circuito AB y cables con elevado aislamiento para el circuito MN.

En cada sondeo fueron utilizadas 4 barras de acero por cada electrodo de corriente (A, B) para disminuir los efectos de las resistencias de contacto y barras de cobre para los electrodos de potencial (M, N).

La fuente de energización utilizada fue constituida por baterías con una diferencia de potencial nominal máxima de 450 V por cada equipo.

Todo el equipo utilizado fue periódicamente controlado.

6.5.5 Interpretación de los resultados

Por lo que se refiere a los principios generales de la interpretación, se puede indicar lo

que sigue:

Los métodos de interpretación existentes, permiten calcular con determinadas ecuaciones las curvas teóricas $\rho_a = f(AB/2)$ para diferentes modelos del subsuelo, cada uno constituido por diferentes capas de espesor definido y resistividad real ρ . Para simplificar la resolución de las ecuaciones, se ha asumido que el espesor de la última capa sea infinito (en la práctica de dimensiones mucho más grandes que las de las otras capas superiores).

Cambiando los parámetros del modelo (número de capas, sus espesores y sus resistividades), se calculan las curvas teóricas correspondientes y se busca la que se superpone de mejor forma a la curva de campo (procedimiento de búsqueda del “best fit”). Una vez encontrado un “fit” satisfactorio, se atribuye el modelo elegido a la vertical del centro “O” del S.E.V. considerado.

Es obvio que cuando se tienen datos de calibración, éstos se colocan en los modelos teóricos como constantes y se dejan variar solo los otros parámetros hasta encontrar el “fit” deseado.

Haciendo las mismas operaciones por cada S.E.V. ejecutado al lado de otro, se definen las secciones geoelectricas interpretativas (ver cuadros desde 3AI hasta 3HIV).

En la práctica, la interpretación se produjo de la forma siguiente:

Se aplicó generalmente un método que consiste en comparar la curva obtenida en las mediciones de campo con curvas patrón, elaboradas por aplicación de fórmulas apropiadas, que figuran en numerosas publicaciones científicas (las primeras fueron editadas por el padre de las interpretaciones de las prospecciones en corriente continua el Ing. Orellana).

Estas curvas, muy numerosas, aparecen en catálogos que las agrupan según el número de capas que representan (curvas de dos capas, de tres, de cuatro, etc.) y según configuraciones típicas (familias A, H, K, Q, etc.).

Esta primera fase permitió elegir el número de capas del modelo interpretativo (reduciendo así las variables de la interpretación) y obtener una buena interpretación preliminar.

Después, la electroestratigrafía resultante por cada sondeo, fue comprobada y optimizada en la computadora con un programa que, sin modificar el modelo geológico en input (en la práctica dejando invariable el número de capas), reduce al mínimo el error cuadrático medio de las diferencias entre las curvas de campo y las curvas teóricas.

Los sondeos eléctricos interpretados incluidos en el Anexo 10, tienen, en general, un error cuadrático medio comprendido entre 2% y 4%.

Para un mejor análisis de los datos obtenidos, fueron elaboradas en fase de interpretación las llamadas Pseudosecciones de Resistividad Longitudinal Diferencial. Éstas se elaboran con valores de resistividad aparente medidos directamente en campaña (sin alguna intervención humana de interpretación) utilizando un “normogram” que permite determinar gráficamente el valor de la Resistividad Longitudinal Diferencial según la fórmula:

$$RLD = \frac{L1 - L2}{\frac{L2}{\rho2} - \frac{L1}{\rho1}}$$

donde:

$$L1 = \frac{AB1}{2}$$

$$L2 = \frac{AB2}{2}$$

$\rho1$ = resistividad aparente referida a $\frac{AB1}{2}$

$\rho2$ = resistividad aparente referida a $\frac{AB2}{2}$

Este procedimiento que no presenta eventuales errores debidos a la interpretación manual gráfica inicial, es útil para aclarar dudas que puedan surgir en la correlación de los electroestratos. La elaboración de estas secciones particulares se realiza principalmente para obtener una mejor visión sobre la situación electroestratigráfica y para poner en evidencia las discontinuidades laterales en el subsuelo.

Es necesario recordar que estas pseudosecciones dan información de tipo cualitativo y no cuantitativo. Para una lectura en términos cuantitativos, es necesario hacer referencia a las secciones geoelectricas (electroestratigráficas) descritas en el capítulo siguiente e incluidas en los cuadros desde 3AI hasta 3HIV.

6.6 Realización de sondeos de exploración, de pozos de observación y de ensayos de bombeo

6.6.1 Realización de los sondeos de exploración y de los pozos de observación

Objetivos y cantidades de los sondeos de exploración

El objetivo general de los sondeos de exploración era obtener datos de variada naturaleza útiles para las diferentes actividades del proyecto, en primer lugar las actividades de modelización de los acuíferos en lo que se refiere a la reconstrucción del modelo conceptual de las seis áreas de estudio.

En el contrato estaba prevista la realización de 44 sondeos, divididos en clases según diámetro de la columna de revestimiento y por profundidades, como se indica en el siguiente esquema. El metraje total previsto era de 3250 metros de perforación. Estos sondeos eran a repartir en las diferentes áreas de estudio según las necesidades.

- Sondeos entubados a aproximadamente 7”
 - de profundidad inferior a 75 m # 20
 - de profundidad entre 75 y 150 m # 5
 - de profundidad entre 150 y 225 m # 2

- Sondeos entubados a aproximadamente 10”
 - de profundidad inferior a 75 m # 8
 - de profundidad entre 75 y 150 m # 2
 - de profundidad entre 150 y 225 m # 1

- Sondeos entubados a aproximadamente 12”
 - de profundidad inferior a 75 m # 3
 - de profundidad entre 75 y 150 m # 2
 - de profundidad entre 150 y 225 m # 1

Durante los estudios ejecutados se individualizaron los siguientes objetivos específicos para los sondeos a perforar en la Planicie Costera Oriental:

- Mejorar el conocimiento geológico-estratigráfico del área de estudio.
- Servir de calibración para la interpretación de la geofísica.
- Adquirir datos relativos a los parámetros hidráulicos de los acuíferos (T, K, S).
- Constituir un embrión de red de control de la salinidad en las zonas costeras interesadas por la intrusión marina.
- Realizar pozos de control aguas abajo de zonas de explotación intensiva por parte de INAPA y/o INDRHI.
- Integrar la red de control piezométrico con pozos dedicados a este efecto.

En relación con estos objetivos específicos y con los de las otras áreas de estudio, y tomando en cuenta la realidad de campo, se evidenció la necesidad de modificar en parte el programa original (ver Anexos memorias - Anexo 11).

Esta modificación se realizó una vez que se acordaron con INDRHI e UTG las modalidades específicas para contabilizar los cambios de acuerdo al presupuesto y a los precios unitarios.

De acuerdo con todo esto se realizaron en total 51 sondeos (7 más de los 44 previstos) totalizando 3422.58 metros de perforación (172.58 más de lo previsto). De éstos se

realizaron en la Planicie Costera Oriental:

Sondeos entubados a aprox. 7”	
- de profundidad inferior a 75 m	11
- de profundidad entre 75 y 150 m	7
- de profundidad entre 150 y 225 m	1

Sondeos entubados a aprox. 10”	-
- de profundidad inferior a 75 m	-

Sondeos entubados a aprox. 12”	
- de profundidad inferior a 75 m	3

Total 22

La ubicación de estos sondeos y un resumen de sus datos se encuentran en la figura Fig. 6.6.1/1 y en la tabla 6.6.1/1.

Objetivos y cantidades de los pozos de observación

El objetivo de estos sondeos era permitir el control de las variaciones piezométricas en zonas de recarga directa y ponerla en comparación con los parámetros climáticos para estudiar las relaciones que controlan la recarga. Para obtener los datos necesarios para lograr este objetivo, los 3 sondeos previstos se ejecutaron al lado de 3 de las estaciones meteorológicas instaladas en el proyecto, se les instaló un sensor de nivel (limnógrafo) y se conectó a uno de los canales disponibles en la unidad de adquisición de los datos de las estaciones. Esto va a permitir obtener en el mismo lugar las variaciones en el tiempo de los parámetros climatológicos (lluvia, temperatura, humedad, radiación solar) y las del nivel piezométrico, datos necesarios para el estudio de la recarga y de sus variaciones en función de los parámetros implicados.

De los 3 pozos de observación previstos, 1 se ejecutó en la Planicie Costera Oriental, al lado de la estación meteorológica de El Peñón, cerca de San Pedro de Macorís, en zona de afloramiento de grava de caliza y caliza arrecifal. El pozo se entubó como previsto a 7”: Su ubicación es visible en la Fig. 6.6.1/1 y un resumen de sus datos en la tabla 6.6.1/1.

Metodología de perforación adoptada

Los 23 sondeos de la Planicie Costera Oriental (22 de exploración y 1 de observación) se ejecutaron utilizando, entre las tecnologías aplicadas en el País, las que mejor se adaptaban a las litologías esperadas y a la obtención de los datos requeridos.

Tomando en cuenta estos factores se realizaron entonces:

- 19 sondeos con rotación directa y circulación de aire, espuma o lodo;
- 3 sondeos con método de percusión.

Sondeos ejecutados con método a rotación

Todos los sondeos ejecutados con método a rotación se realizaron según el siguiente esquema:

- a) Perforación con el diámetro adecuado (superior al diámetro final previsto) de los terrenos más superficiales, sueltos o que pudieran tener problemas de estabilidad, hasta encontrar la roca o terrenos más estables;
- b) Introducción de una tubería provisional de diámetro adecuado;

- c) Continuación de la perforación con diámetro reducido (final previsto) hasta la profundidad requerida;
- d) Limpieza del sondeo con aire/agua o productos adecuados en caso de utilización de polímero;
- e) Introducción de la columna de producción con tubos ranurados y ciegos cuya posición se elige en relación con la profundidad, el nivel estático y la utilización prevista del sondeo (observación piezométrica, red de salinidad, bombeo);
- f) Introducción de grava entre la tubería y las paredes del sondeo hasta dos metros más arriba de la profundidad donde se encuentran los tubos ranurados más superficiales;
- g) Limpieza y desarrollo del sondeo con aire y/o bomba. Se completa también el relleno de grava si se ha compactado durante estas operaciones;
- h) Realización de un tapón de arcilla de alrededor 2 metros;
- i) Extracción de la tubería provisional;
- j) Relleno del espacio entre la tubería y las paredes del sondeo, por encima del tapón de arcilla hasta 5 metros de la superficie con los ripios de perforación;
- k) Realización de la cementación de los últimos 5 metros para protección sanitaria del acuífero;
- l) Realización en la superficie de una base de cemento cuadrada de 1 metro de lado;
- m) Realización de una protección del tubo de la columna de revestimiento, con un tubo de acero de diámetro adecuado introducido en el cemento de la base, cerrado con tapa y candado.

Sondeos ejecutados con método a percusión

Todos los sondeos ejecutados con método a percusión se realizaron según el siguiente esquema:

- a) Perforación con diámetro adecuado hasta la profundidad requerida con inserción progresiva de una tubería provisoria en acero;
- b) Limpieza del sondeo con “cubo” (cuchara);
- c) Introducción de la columna de producción con tubos ranurados y ciegos cuya posición se elige en relación con la profundidad, el nivel estático y la utilización prevista del sondeo (observación piezométrica, red de salinidad, bombeo);
- d) Extracción progresiva de la tubería provisional e introducción de grava entre la tubería y las paredes del sondeo hasta dos metros más arriba de los tubos ranurados más superficiales;
- e) Limpieza y desarrollo del sondeo con bomba y completando el relleno de grava después de la compactación durante el desarrollo;
- f) Realización de un tapón de arcilla de alrededor 2 metros;
- g) Continuación de la extracción de la tubería provisional y del relleno del espacio entre la tubería y las paredes del sondeo, por encima del tapón de arcilla hasta 5 metros de la superficie con los ripios de perforación;
- h) Realización de la cementación de los últimos 5 metros para protección sanitaria del acuífero;
- i) Realización en la superficie de una base de cemento cuadrada, de 1 metro de lado;
- j) Realización de una protección del tubo de la columna de revestimiento, con un tubo de acero de diámetro adecuado introducido en el cemento de la base, cerrado con tapa y candado.

6.6.2 Realización de ensayos de bombeo

En el área se han realizado 14 ensayos de bombeo, ampliamente descritos en el Anexo

12, y cuyos resultados han sido sintetizados en la Tab.6.6.2/1.

Todos los ensayos han tenido una duración de 72 horas.

En todos los pozos a bombear se han instalado electrobombas sumergidas con alimentación por generadores eléctricos en donde no tuvo la posibilidad de recurrir a la red eléctrica.

El caudal de bombeo se ha elegido de acuerdo con los observados durante la perforación y el desarrollo de los pozos; en caso de utilización de los pozos privados, los caudales estaban ya conocidos.

Para permitir la correcta medida de los niveles, en la mayoría de los pozos se han instalado tuberías de diámetro pequeño como guya para el medidor.

Los niveles durante el ensayo (sea en los pozos sea en los piezómetros de observación), han sido medidos a través de sondas eléctricas con cable plano de 2 conductores y hilo de acero, cuya señal sonora o luminosa indica el contacto con el agua. El hilo está graduado un centímetros.

Todos los pozos se han dejado en paro 24 horas antes de empezar los ensayos, de manera que el nivel estático no fuese afectado por errores y por eso representativos del nivel natural del acuífero.

Para la medida y el ajuste del caudal de bombeo, como es extremadamente importante que quede lo mismo a lo largo del ensayo, se han utilizado recipientes de capacidad conocidas y cronómetros de precisión para la medida del tiempo de llenado.

Con este método, aunque bastante preciso, no se consigue una regulación instantánea del caudal extraído y por eso, cuando ha sido posible, se han empleado contadores totalizadores.

La medición de los niveles han estado efectuadas a intervalos regulares, así que estas han podido quedar regularmente distribuidas en una escala logarítmica.

Se han tomado todos los cuidados necesarios para que el agua extraída no volviese al acuífero. Por eso el agua bombeada se ha descargado a una distancia mediamente superior a 100 m aguas abajo de la dirección del flujo, a través de tuberías puestas en obra a tal fin, y vertiendo el agua en barrancos, arroyos o canales que no tiene conexión hidráulica con el acuífero.

Al paro de la bomba, después de 72 horas de ensayo, se han medido los niveles en subida, al fin de calcular el parámetro de transmisividad también con los métodos de recuperación, es decir con medida del los ascensos con frecuencia similar a la de los descensos; este método es más preciso por no tener problemas de las turbulencias generadas por el bombeo.

6.7 Integración de la red meteorológica existente

A fin de suplir la información de la red meteorológica existente del INDRHI y de la ONAMET (véanse Anexos Memorias n° 1 y 2), se instalaron 12 estaciones meteorológicas de tipo automático con alimentación por panel solar y con archivo en disco magnético de los valores medidos, es decir: precipitación, temperatura del aire, humedad relativa, radiación solar, dirección y velocidad del viento, evaporación (tanque tipo A).

La instalación de las estaciones meteorológicas fue efectuada en dos distintos momentos:

- en el mes de septiembre del año 1997 se instalaron 8 estaciones meteorológicas, es decir:
 - Salvaleón de Higüey;
 - El Naranjal (San rafael del Yuma);
 - El Peñón (San Pedro de Macorís);
 - Piedra Blanca (El Seibo);
 - Batey Excavación (Quisqueya);
 - Hato Mayor del Rey (Guayabal - Yerba Buena);
 - Batey Triple Ozama (Monte Plata);
 - Cómate Bayaguana;

- en el mes de agosto del año 1999, consiguientemente a una variante de proyecto, se instalaron 4 estaciones ulteriores:
 - Sabana de la Mar (para garantizar un conocimiento más completo de las características climáticas del territorio de interés);
 - La Guama (Salvaleón de Higüey);
 - Bayahibe (La Romana);
 - Cítricos Dominicanos (Villa Altagracia - El Mingolo).

La identificación de los sitios idóneos para la instalación de las estaciones meteorológicas ha sido desarrollada en las siguientes fases:

- selección preliminar, en la oficina, de la distribución óptima de los sitios en los cuales ubicar las estaciones meteorológicas, teniendo en cuenta en particular:
 - el nivel de operatividad y fiabilidad de las estaciones climáticas vigentes;
 - la densidad y la distribución altimétrica de la red vigente;
 - la elevada variabilidad espacial de los parámetros climáticos;

Por cuanto atañe a la selección de los sitios idóneos para la instalación de las ulteriores 4 estaciones meteorológicas, se consideró también la oportunidad de integrar la red ya operativa para garantizar un mejor control de áreas afectadas por particulares condiciones climáticas, por ejemplo el sector oriental de la Planicie (Bayahibe-La Romana) y la cuenca del río Haina (Cítricos Dominicanos Villa Altagracia - El Mingolo).

- comprobación en el campo, de la posibilidad de efectuar la instalación considerando distintos factores, como.
 - facilidad de acceso;
 - idoneidad de los sitios (área casi llana, ninguna y/o mínima interferencia de árboles y de infraestructuras existentes o previstas);
 - seguridad contra actos vandálicos;

- disposición de los dueños de los terrenos a dejar instalar las estaciones.

La inspección ocular en los sitios de interés fue llevada a cabo junto con funcionarios del INDRHI, y en particular con Antonio Ortíz Mena, Encargado de la Sección de Redes.

En el Anexo Memorias n° 2 se presentan la ubicación de las estaciones instaladas, los valores diarios y mensuales de los parámetros climáticos medidos junto al análisis sea del régimen climático, que de la marcha de la precipitación y de la velocidad del viento asociada al paso del huracán George en el mes de septiembre 1998.

6.8 Hidrología

6.8.1 Campañas de aforos en los ríos y canales

A fin de integrar y completar la información de la red hidrométrica del INDRHI se han efectuado dos campañas de aforos (septiembre 1997 - septiembre 1998, junio 1999 - agosto 1999) en diferentes secciones de los ríos que se encuentran en la zona de estudio, red de aforos del estudio (véase Anexo Memorias n° 13).

El diseño de la red de la primera campaña de aforos, la cual ha incluido también estaciones hidrométricas vigentes y/o suspendidas del INDRHI para alcanzar una distribución espacial óptima, ha sido desarrollado según los siguientes criterios básicos :

- criterios hidrogeológicos: el ingreso y la salida de la zona hidrogeológica afectada, puntos singulares (manantiales o cachones) y/o tramos de intercambio napa-río;
- criterios hidrológicos: régimen previsible de las corrientes de agua (ríos con régimen permanente y/o esporádico);
- criterios hidrográficos: principales confluencias e influencia de la marea;
- criterios económicos: existencia de obras que pueden modificar el régimen natural de las corrientes de agua, es decir: presas reguladoras, sistemas de riego y drenaje, diques derivadores para abastecimiento agrícola y urbano/rural.

Teniendo en cuenta tanto la comprobación en el campo de la posibilidad de efectuar las medidas de caudal, como los conocimientos adquiridos en los primeros períodos del estudio, se han identificado 35 lugares idóneos, en particular 34 secciones en cauces naturales y 1 en canal de riego (canal Yabacao), para efectuar medidas mensuales de caudal.

En la Tabla 6.8.1./1 aparecen los puntos de la red de aforos (evidenciando las secciones no consideradas en la segunda campaña), la ubicación de los cuales se presenta en el Anexo Memorias n° 13.

En el período junio-agosto 1999 se ha efectuado una segunda campaña de aforos en las zonas hidrológico-hidrogeológicas de interés.

El diseño de la nueva red ha sido desarrollado según los siguientes criterios básicos:

- representatividad hidrológica de las secciones consideradas a fin de caracterizar completamente en las zonas hidrogeológicas de interés tanto el régimen hidrológico como el intercambio napa-río, a la luz de los resultados de la primera campaña;
- mejor control del efecto sobre el régimen natural de la escorrentía de los principales canales destinados al riego que actualmente no son objeto de control sistemático;
- verificación de la posibilidad efectiva de efectuar mediciones en el cauce también sucesivamente a las modificaciones hidro-morfológicas consiguientes al paso del huracán George (sept. 98);
- disponer de una red de referencia eficiente y eficaz como sostén para la individuación de la red hidrométrica básica de control (ref. cap. 9.8 y Mapa n° 2).

Sobre la base de lo descrito anteriormente, se han considerado en total 35 secciones de aforos de las cuales 2 relativas a canales de riego (canales Yabacao y Haina).

En la Tabla 6.8.1./2 aparecen los puntos de la red de aforos, evidenciando las nuevas secciones, la ubicación de los cuales se presenta en el Mapa n° 2 (Red de control hidrogeológico e hidrométrico).

6.8.2 Instalación de regletas hidrométricas

En los Términos de Referencia, estaba prevista la instalación, en los cursos de agua superficiales, de 90 regletas hidrométricas (miras) en las seis zonas de estudio, para renovación e integración de la red de control hidrométrica del INDRHI.

Con el paso del huracán George en Septiembre de 1998, la red existente sufrió daños muy graves, tanto por la destrucción de las infraestructuras que las sustentaban, como por el desvío del curso de muchos ríos. Con estos acontecimientos, se presentó entonces, como prioridad absoluta, la reconstrucción de la red ya existente, con el fin de dar continuidad a las series históricas de medidas.

Todo esto significó un cambio radical en el diseño que se estaba definiendo, y condicionó la tipología de las instalaciones (se tuvieron que construir obras civiles inicialmente no previstas para sustentar muchas de las miras a instalar para la reconstitución de la vieja red de control) y la distribución inicialmente considerada.

La campaña de instalación se llevó a cabo en el segundo semestre del año 1999.

De las 90 regletas disponibles, 47 se instalaron en la Planicie Costera Oriental, distribuidas en 18 estaciones, todas pertenecientes a la vieja red de control del INDRHI.

En la tabla 6.8.2/1 se encuentran los nombres y los datos de ubicación de las 18 estaciones indicadas.

6.8.3 Evaluación de la recarga

Para llegar en la zona hidrogeológica de interés a una estimación de los recursos disponibles de agua subterránea (tasa de recarga) fidedigna y significativa para proporcionar datos que sirvan de base, juntos con otros aspectos del estudio, a la evaluación del potencial aprovechable de los recursos hídricos subterráneos (cap. 6.10.2 y 8) y para la implementación de los modelos matemáticos de flujo subterráneo (cap. 6.12.1 y 7.1.9), nos hemos basado en el siguiente recorrido metodológico (por más detalles, hagase referencia al cap. 2 del Anexo Memorias n° 14):

a nivel de zona hidrogeológica:

- individuación de las principales fuentes de recarga del agua subterránea (recarga pluvial directa, por infiltración de escorrentía superficial, en particular del flujo base, en los cauces, procedente de sistemas acuíferos cercanos en conexión hidráulica y por execo de riego);
- individuación de sub-zonas bastante homogéneas en sentido hidrogeológico (formaciones porosas o fisuradas homogéneas en función de la distribución y tipología de los litotipos permeables que afloran), climático (en particular hacia la marcha de la precipitación), hidrológico y morfológico;

a nivel de sub-zona:

- evaluación del área y de la lluvia media hiperanual;
- análisis de las características del medio ambiente que más influyen sobre el ciclo natural del agua (marcha morfológica, desarrollo del retículo hidrográfico, régimen de las corrientes de agua, naturaleza de los suelos y de la vegetación);
- individuación de las estaciones meteorológicas de referencia;
- individuación de la metodología más apropiada para evaluar la tasa de recarga (balance hidrometeorológico y/o descomposición de hidrogramas diarios); metodología relacionada con la comprensión de los factores meteoroclimáticos, hidrológicos e hidrogeológicos que influyen y/o caracterizan al ciclo natural del agua;
- evaluación de la tasa anual media de recarga del agua subterránea, desagregada con referencia a las fuentes de recarga;
- comparación de los resultados obtenidos con aquéllos de otros estudios desarrollados en la misma área y/o en áreas cercanas similares;
- evaluación de la tasa de recarga pluvial directa con referencia a años húmedos y secos de período de retorno asignado (un año de cada 5 y un año de cada 10).

Para el desarrollo del estudio se tomaron en consideración:

- la cartografía hidrogeológica desarrollada en el ámbito del proyecto (Anexo Memorias n° 18 y Mapas n° 9);
- los resultados alcanzados en la caracterización climática e hidrológica del área de estudio (cap. 3 y 7.2);
- la información disponible en estudios desarrollados con referencia a las áreas de interés y/o áreas cercanas cotejables;
- los resultados alcanzados en la caracterización de los suelos (cap. 7.3) y la información disponible respecto a la eficiencia global de riego y al caudal de operación de los principales canales-sistemas de riego encontrada en literatura técnica y facilitada por el INDRHI (División de Manejo de Tierras y Aguas);
- los resultados alcanzados en la implementación de los modelos matemáticos de flujo de las aguas subterráneas (cap. 7.1.9) por cuanto atañe en particular a la sustentabilidad ambiental de los valores estimados de recarga directa relativamente a las distintas sub-zonas hidrogeológicas individuadas.

6.9 Agronomía - Edafología

El objeto del presente estudio ha sido individualizar, a través de actividades de tipo agronómico y edafológico, las áreas susceptibles de riego, las zonas actualmente **bajo riego** y las cantidades de agua subterránea y superficial utilizadas a fines agrícolas.

El estudio ha sido subdividido en dos partes principales: la primera referida a la revisión de las áreas con regadío actualmente presentes en la Planicie Costera Oriental; en el ámbito de esta actividad, se ha efectuado una caracterización del sector agrícola del distrito de riego, a través de la individualización de los principales cultivos efectuados y de las prácticas agronómicas. Las áreas regadas han sido subdivididas en tres grupos: áreas regadas con aguas superficiales, áreas regadas con aguas subterráneas, áreas regadas con sistemas mixtos. ~~aree irrigate sono state suddivise in tre gruppi: aree irrigate con acque superficiali, aree irrigate con acque sotterranee e aree irrigate con sistemi misti.~~ Se han calculado además las necesidades hídricas para cada cultivo.

En la segunda parte del estudio se han individualizado, entre las áreas agrícolas no regadas, aquéllas con mayor o menor susceptibilidad al riego. Para obtener este resultado, se ha efectuado una campaña edafológica, que ha comprendido la ejecución de perfiles, barrenados, muestreos y análisis químicos de los suelos, ensayos infiltrométricos.

6.9.1 Campaña agronómica y edafológica

El estudio de cada elemento que caracteriza a un determinado territorio permite individualizar cuáles factores naturales y artificiales (antrópicos) han condicionado la formación y la evolución del ambiente estudiado, y cuánto dicho condicionamiento se ha prolongado hasta hoy.

El análisis de las relaciones existentes entre los factores anteriormente citados permite la subdivisión del territorio en áreas, cada una de las cuales está caracterizada por una diferente combinación de tales factores.

A través de una fotointerpretación preliminar, se han determinado una serie de áreas homogéneas caracterizadas por factores similares.

Después del control en campo, se ha procedido a una revisión de la fotointerpretación preliminar, y sobre la base de los datos recopilados en campo, se ha llegado a distinguir la distribución geográfica de los distintos tipos de suelo.

Se ha procedido además a la recopilación y al análisis del material bibliográfico y cartográfico existente, efectuados en la sede central del INDRHI y en las sedes periféricas.

Se hace presente que la bibliografía hallada está representada por documentación parcial (informes sin cartografía anexa), o por estudios a nivel de hacienda en pequeñas superficies.

El **levantamiento** ~~relevamiento~~ ha sido programado sobre la base de un plan que ha permitido una organización racional de **las actividades de campo** ~~los levantamientos~~, junto con una homogénea distribución territorial de **las mismas**.

Se ha adoptado un tipo de **levantamiento** ~~relevamiento~~ denominado “razonado”, es decir que ha tenido en cuenta las características territoriales capaces de influir sobre la génesis de los suelos.

La campaña de **levantamiento** ~~relevamiento~~ edafológico ha consistido en:

Individualización de los puntos de observación

Presuposición fundamental del levantamiento ~~relevamiento~~ “razonado” es la individualización de puntos de observación que puedan ser representativos del territorio objeto de estudio. Los puntos han sido elegidos sobre la base de la fotointerpretación preliminar, del sucesivo control de campo ~~in-situ~~ y con la observación de numerosas secciones expuestas, también en las zonas cubiertas por la bibliografía ~~a los~~ fines del control.

Ejecución de 45 perfiles

Para cada perfil se han tomado en promedio tres muestras, sobre las cuales se han efectuado análisis físico-químicos específicos, útiles para la definición de la susceptibilidad al riego. En particular, para cada muestra, se han analizado los siguientes parámetros: ~~In particolare, per ciascun campione, sono stati analizzati i seguenti parametri:~~

textura

limo

arcilla

arena

conductividad eléctrica

densidad aparente

punto de marchitez

capacidad de campo

sustancia orgánica

pH

nitrógeno

fósforo

potasio

carbonato de calcio

capacidad de interscambio de cationes

—

Ejecución de 400 barrenados para una correcta determinación de la textura de los suelos y para definir mejor los límites de las diferentes unidades cartográficas (ver más adelante es este mismo informe). ~~—~~

Durante la campaña se han cumplido además observaciones puntuales de los suelos, que han constituido una ulterior ayuda ulterior para la definición de las áreas susceptibles al riego;

Ejecución de 9 ensayos infiltrométricos, localizados en proximidad de perfiles representativos de cada una de las series de suelo.

6.9.2 Identificación zonas con regadío actual y de zonas potencialmente regables

El estudio realizado ha permitido la producción de un mapa de las áreas irrigadas y de la susceptibilidad a la irrigación, que contiene las siguientes informaciones:

- áreas agrícolas no regadías
- áreas agrícolas regadas con aguas subterráneas
- áreas agrícolas regadas con aguas superficiales
- áreas agrícolas regadas con aguas mixtas

- áreas regadas ocasionalmente con aguas superficiales
- principales cultivos efectuados
- susceptibilidad a la irrigación de las áreas actualmente no regadas.
- localización de los perfiles edafológicos realizados

Para su realización, se han llevado a cabo las siguientes fases de trabajo:
delimitación de las áreas de estudio sobre la base topográfica en escala 1:50.000;
fotointerpretación de fotos aéreas en escala promedio 1:40.000 en blanco y negro,
derivadas de vuelos efectuados en los años 1983/1984; la interpretación ha sido
efectuado según el criterio de la predominancia: a cada uno de los polígonos se le ha
asociado el cultivo predominante;~~interpretazione è stata effettuata secondo il criterio della
prevalenza: a ciascun poligono è stata cioè associata la coltura prevalente;~~

verificación, actualización y terminación de la fotointerpretación a través de
investigaciones e inspecciones de campo;

digitalización de las informaciones cartográficas;

construcción del mapa y de la leyenda en ambiente GIS;

asociación a cada polígono de las siguientes informaciones alfanuméricas:

- áreas agrícolas (se trata de superficies brutas, que comprenden taras áreas agrícolas
(se trata de superficies brutas, que comprenden taras como carreteras, caminos,
canales, terrenos no cultivados), subdivididas en:
 - áreas agrícolas no regadas;
 - áreas regadas con aguas subterráneas (100%);
 - áreas regadas con aguas superficiales (100%);
 - áreas regadas con aguas mixtas (% de agua superficial y subterránea);
 - áreas regadas ocasionalmente con aguas superficiales;
- cultivos predominantes en el momento del estudio, subdivididos así:
 - caña de azúcar
 - sabana
 - sabana-pasto
 - sorgo
 - arroz-frijoles
 - arroz-cultivos mixtos
 - arroz
 - pasto
 - plátano-pasto
 - plátano-hortícolas
 - plátano-cultivos mixtos
 - plátano
 - tomate
 - hortícolas
 - maíz
 - guandul
 - habichuela
 - cultivos mixtos-sabana
 - cultivos mixtos-pasto
 - cultivos mixtos

En el presente estudio se definen además los volúmenes de agua de riego necesarios
para los cultivos en el distrito de riego. Los volúmenes de agua han sido determinados
mediante la realización de un balance hídrico agronómico en relación con los cultivos

presentes.

Para la determinación de dicho balance hídrico se ha adoptado un modelo agronómico, que ha requerido informaciones sobre los suelos, clima y sobre los cultivos en cuestión.

Para calcular las demandas de agua de un área ha sido necesario conocer:

- 1) el área a regar;
- 2) el programa de los cultivos;
- 3) el ciclo vegetativo de cada cultivo;
- 4) la demanda de agua de cada cultivo;
- 5) las precipitaciones y demás aportes hídricos;
- 6) la eficiencia total del sistema de riego.

El balance hídrico permite determinar los probables volúmenes de agua que pueden ser utilizados por los cultivos, mediante la evaluación de la dinámica hídrica total en el sistema suelo-planta-atmósfera en ciertas condiciones agroecológicas dadas.

Los componentes del balance hídrico son: aportes de agua por precipitación y/o riego, sustracciones de agua, como ~~escorrentia~~ escurrimiento superficial, percolación o drenaje interno, evaporación y transpiración y el saldo hídrico o cambio de humedad en el perfil del suelo.

El cálculo del balance hídrico señala, en términos generales, períodos de déficit y períodos con exceso de agua.

El período de déficit pone en evidencia el lapso en el cual los cultivos dependerán del riego artificial; el período de exceso, al contrario, da una indicación de la posible existencia de problemas de drenaje superficial y/o subterráneo, cuando no existan condiciones naturales, que facilitan la evacuación de ~~las excedentes~~ y a su vez, permite cuantificar el grado de recarga de los acuíferos subterráneos.

Teniendo en cuenta que los datos climáticos están publicados en promedios mensuales, éste es el intervalo adoptado para efectuar el balance; sin duda, dado que la evaporación y los elementos climáticos de los cuales depende (radiación, temperatura, tensión de vapor, etc.) son fenómenos continuos y la precipitación es un fenómeno esporádico, puede haber diferencias notables en el resultado del balance, al alargar o acortar el período.

Un balance hídrico con un intervalo semanal permitiría individualizar períodos críticos, que ocasionalmente aquejan sensiblemente al rendimiento de los cultivos, especialmente cuando, tratándose de cultivos anuales de radicación superficial, las diferencias aumentan con la disminución de las capacidades de almacenamiento del agua durante el período de lluvia.

Para el cálculo de las necesidades hídricas de los cultivos, se ha tratado de suministrar contemporáneamente el dato final (en la forma más agregada posible) y todos los datos de partida, con la posibilidad de formular hipótesis variando los datos de partida, para obtener inmediatamente una respuesta, con la consiguiente variación del dato final. Para satisfacer estas exigencias se ha realizado una hoja electrónica, que se ha mantenido lo más uniforme posible para todas las estaciones meteorológicas consideradas.

[A la luz de lo expuesto](#)~~Alla luce di quanto esposto~~, se han elaborado dos tablas: en la primera está calculada la demanda neta de agua, mensual y anual, de cada cultivo, referida a una superficie de 1 hectárea.

En la segunda tabla están calculadas las necesidades hídricas totales, considerando el orden promedio de los cultivos del trienio 1995-1998. [Esta tablas han sido agregadas al Anexo 16.](#)~~Queste tabelle sono state riporate in allegato all'Annesso 16.~~

En fase de elaboración, se ha procedido además a la definición de la susceptibilidad de los terrenos al riego (indicada en el mapa en escala 1:100.000); se ha procedido a la subdivisión del territorio de estudio en clases texturales homogéneas, a fin de suministrar un valor a utilizar como input para la determinación de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos.

Para la determinación de la susceptibilidad de los terrenos al riego, se han utilizado los datos procedentes del ~~levantamiento~~ ~~relevamiento~~ edafológico; la susceptibilidad se ha visto en efecto como la propensión de un terreno a hospedar cultivos regadíos, considerando la existencia de eventuales limitaciones derivantes de factores físicos y edafológicos, sin tomar en consideración la eventual disponibilidad hídrica o factores de tipo socioeconómico.

La susceptibilidad de los suelos al riego ha sido evaluada según la metodología USBR (1953) que prevé el uso de 6 clases y 3 subclases. La clasificación está estructurada por lo tanto de la siguiente manera:

- Clase 1** Arable: terrenos muy idóneos para la agricultura regadía, capaces de sustentar altas producciones en el tiempo con plantas climáticamente aptas. Alta capacidad de dar rédito – No tiene subclases.
- Clase 2** Arable: terrenos moderadamente aptos para el riego. Son adecuados para un menor número de cultivos y necesitan mayores costos de transformación o son menos productivos que los anteriores. Potencialmente tienen una capacidad intermedia de dar rédito.
- Clase 3** Arable: están considerados como marginales para el riego y menos aptos que los de la clase 2. Tienen una severa deficiencia o varias moderadas deficiencias en el suelo, en la topografía o en el drenaje. Es posible obtener un rédito satisfactorio sólo con una gestión adecuada.
- Clase 4** Poco arables o para usos especiales: tienen deficiencias muy acentuadas que implican costos elevados para superarlas y no garantizan siempre la amortización de los capitales invertidos. Son sin embargo aptos para el riego con plantas de alto rédito y para haciendas de gestión familiar. Si se los utiliza para usos especiales pueden dar réditos superiores a los de las tres clases anteriores.
- Clase 5** Terrenos no arables: presentan deficiencias graves como salinidad y/o sodicidad excesiva, drenaje inadecuado, riesgo de desbordes y demás. Estas deficiencias son tan amplias que requieren ulteriores estudios agronómicos, económicos y de ingeniería para determinar su irrigabilidad. Es por lo tanto una clase provisional que podrá ser retrocedida a clase 6 o llevada a una clase arable en el momento en que los ulteriores estudios requeridos y los trabajos necesarios para su restablecimiento den respuestas positivas.
- Clase 6** No arables: son terrenos con limitaciones que no pueden ser eliminadas como fuertes pendientes, fenómenos de erosión, rocosidad superficial, escaso drenaje, etc. No ofrecen por lo tanto las garantías mínimas requeridas por las clases anteriores y un eventual plan de riego no implicaría nunca una recuperación de los capitales invertidos.

Además de las clases indicadas arriba, la clasificación USBR prevé 3 subclases: (s = deficiencias del suelo; t = deficiencias de topografía y d = deficiencias de drenaje) y respectivas combinaciones (st – sd; td – std) las cuales indican los motivos de la

colocación de los terrenos en una determinada clase.

En la tabla siguiente están indicados los valores de las clases consideradas; no está presente la clase quinta, porque, dada la amplia área investigada y a disposición para la introducción del riego, no se han tomado en consideración terrenos que habrían impuesto costos demasiado altos para su puesta en cultivo:

SUB CLASES	LIMITACIONES	CLASES (*)				
		1	2	3	4	6
Suelo	Profundidad en cm	>180	180-120	120-80	80-50	<50
	Esqueleto	<5%	5-25%	25-50%	>50%	
	Textura terrenos pesados	F	FA-FL	A	Arcilla alcalina o impermeable	
	Textura terrenos ligeros	F	FS	S	Arena gruesa	
	Reacción terrenos alcalinos	6,6-7,3	7,3-8,4	8,4-9	>9	
	Reacción terrenos ácidos.	7,3-6,6	6,6-5,4	5,4-5	<5	
	Salinidad en mS/cm (ECe)	0-4	4-8	8-15	15-30	>30
	Alcalinidad ESP	0-6	6-10	10-15	15-40	>40
	Permeabilidad en cm/h poco permeables	6-2	2-0,5	0,5-0,1	<0,1	
	Permeabilidad en cm/h demasiado permeables	2-6	6-12,5	12,5-25	>25	
Topografía	Pendiente %	0-5		5-8	8-16	>16
	Erosión	Ausente	Débil	Moderada	Excesiva	
	Nivelado del microrrelieve: en mc/ha	<600	600-1200	1200-2000	>2000	
Drenaje	Inundación	Ausente	Muy rara	Rara	Frecuente	
	Profundidad de capa en cm	>200	200-150	150-100	<100	
	Vías de deflujo de las aguas:	Presentes			Ausentes	

(*) La 5° clase no aparece en la tabla siendo una clase provisional

Para la asignación a una clase se elige el valor más limitante: por ejemplo un terreno que tuviera una pendiente mayor del 16% sería asignado a la sexta clase, aunque todos los demás valores pertenecieran a la primera. En la leyenda estaría indicado así: 6t o bien seis la clase, t la subclase que indica un límite topográfico.

6.10 Evaluación de la utilización del agua

6.10.1 Instalación de contadores volumétricos

En el ámbito de las actividades relacionadas con la evaluación del grado de explotación de las aguas subterráneas (cap. 6.10.2, 7.1.11 y Anexo Memoria nº17), como ayuda para la estimación de los consumos, se instalaron, 17 contadores volumétricos a la salida de pozos para uso doméstico y para riego para cuantificar los volúmenes de agua subterráneas extraídos.

Los contadores volumétricos instalados, modelo WAI de turbina tangencial y paso del agua de flujo libre, son fabricados por la Sociedad ABB-ASTRA CONTATORI s.r.l. de Gavirate, Varese (Italia).

Los contadores arriba citados, de diámetro nominal comprendido entre los 100 mm (4”) y los 250 mm (10”), están diseñados a propósito para la utilización también con aguas de riego y pueden ser instalados en posición vertical, horizontal e inclinada respecto del eje de la tubería, sin que se verifique ningún problema desde el punto de vista de la medición, siempre que el movimiento en la tubería sea de tubo lleno (contador completamente enajenado) y se respeten las distancias de eventuales curvas o compuertas iguales a aproximadamente por lo menos 10 DN por arriba y 5DN por debajo del tramo rectilíneo de tubería. El cuerpo del contador, protegido con pintura epoxídica, es de hierro fundido (UNI G25), el grupo de medida puede extraerse e intercambiarse con varios diámetros diferentes, facilitando las reparaciones y las substituciones. La lectura del volumen fluido, en m³, está garantizada por el reloj seco y de lectura directa, protegido por una tapa de metal.

La instalación de los contadores volumétricos fue efectuada en los meses de enero y febrero del año 1999, la identificación de los sitios idóneos ha sido desarrollada en las siguientes fases:

- selección preliminar, en la oficina, de la distribución óptima de los sitios en los cuales ubicar los contadores teniendo en cuenta en particular las características hidrogeológicas de los acuíferos afectados y la tipología y el nivel de las utilidades existentes de manera de individualizar pozos y/o grupos de pozos representativos de las modalidades y de la entidad de las tomas de aguas subterráneas en el territorio de interés;
- verificación en el campo tanto para confirmar la posibilidad de efectuar la instalación (facilidad de acceso e idoneidad de los pozos y de las tuberías), como para definir, en particular para los pozos para riego, eventuales intervenciones estructurales sobre la tubería a la salida del pozo mismo necesarias para garantizar el flujo de las aguas a pleno tubo en correspondencia del contador.

Para los contadores volumétricos instalados, en la tabla 6.10.1/1 se presentan los datos característicos de los pozos objeto de instalación (código, coordenadas, localidad, tipo de bomba, uso, propietario y fecha de instalación y de última lectura) junto con el valor de la lectura final en el contador, la ubicación de los cuales se presenta en el Mapa nº 8.

En conjunto, en el período enero - septiembre se midieron 578432 m³ para uso de riego (INDRHI y CEA) y 3774361 m³ para uso domestico (INAPA, C. Romana).

6.10.2 Balances hídricos aguas subterráneas

Se ha procedido al análisis integrado de los resultados de los estudios hidrológico, agronómico y modelístico, tratando por separado las entradas y las salidas del sistema. En particular se ha procedido a un nuevo examen de los valores de recarga, con referencia tanto a las condiciones de un año promedio como a las de un año seco, con tiempo de retorno de 10 años, siendo estas últimas representativas de las situaciones más críticas en términos de recurso aprovechable. El papel de los cursos de agua (p. ej. alimentación o drenajes) y la entidad de los intercambios con el mundo subterráneo, la evaluación de los flujos a lo largo del área costera) y la evaluación de las explotaciones han completado el cuadro de referencia.

En particular, la evaluación de las explotaciones ha sido objeto de un análisis más pormenorizado. Se trata en efecto de un tema bastante controvertido, condicionado por la general falta de datos exhaustivos y fiables y sobre todo no tratado en otros anexos de proyecto. Los datos disponibles son substancialmente los de fuente INAPA y CAASD, por lo que atañe al abastecimiento de la red de acueductos, estimaciones de campo adquiridas a través de entrevistas y evaluaciones indirectas en el curso de las actividades de monitoreo de proyecto, y los datos adquiridos por los contadores volumétricos instalados en el curso del proyecto. Aunque estuviesen presentes en un número más bien limitado; estos últimos han resultado de un cierto interés, también con relación al control cruzado de los datos oficiales suministrados por CAASD e INAPA.

Los datos demográficos elaborados por la Oficina Nacional de Estadística, han permitido una evaluación indirecta de los consumos potables, teniendo como referencia tanto los estándares de consumo individual normalmente adoptados en la República Dominicana (100-150 l/habitante/día) como hipótesis de variaciones apreciables a nivel local. Un porcentaje adicional ha sido generalmente hipotetizado para tener en cuenta los consumos que atañen a las actividades productivas, comerciales y recreativas.

Las informaciones disponibles por lo que se refiere al sector turístico (número de presencias diarias, existencia de infraestructuras, etc....) han sido evaluadas a la luz de los consumos individuales generalmente muy elevados (700 l/turista/día) y del impacto de todas maneras elevado en términos de demanda hídrica.

Por lo que concierne a los consumos para fines agrícolas, se han considerado críticamente los resultados del estudio agronómico (véase Anexo Memorias n°16), con particular referencia a los cultivos practicados, a las exigencias hídricas netas y brutas (con hipótesis de eficiencia total generalmente de alrededor del 30%), a la extensión areal de los cultivos. En particular esta última ha sido evaluada a partir de de las macroáreas individualizadas por el estudio agronómico; el porcentaje de vez en vez realmente cultivado (las macroáreas comprenden en efecto a su vez sectores antropizados – aldeas, carreteras, ... - o sectores no cultivados o abandonados) ha sido evaluado sobre la base de la experiencia de campo y verificado frente a los datos INDRHI disponibles sobre la extensión de los cultivos en el curso de los últimos 3 años. El cuadro se ha completado luego, presentando también los términos de recarga adicional por exceso de riego, que han constituido objeto de calibración en el curso de las actividades de modelización y que son obviamente de particular importancia en áreas con fuerte irrigación con aguas superficiales y litologías superficiales relativamente gruesas.

Para cada área, se ha concluido el estudio con un examen crítico del balance hídrico, con particular atención en poner en evidencia las condiciones críticas en términos cuantitativos (aprovechamiento elevado respecto de la recarga total) y la división, donde era necesario, en sub-áreas de distinta criticidad. Aunque no concerniese estrictamente al tema del balance hídrico, se han relevado también aquellas situaciones críticas desde el punto de vista cualitativo, con particular referencia a las áreas costeras y a los fenómenos de intrusión salina en acto.

6.10.3 Balances hídricos aguas superficiales

La evaluación de los balances hídricos se ha basado en la interpretación, en escala de zona hidrológico-hidrogeológica y de sub-áreas internas a ellas, del estado que deriva de hecho del balance entre disponibilidades naturales y modalidad y entidad actuales de las utilizaciones, identificando las problemáticas existentes y/o posibles consiguientes a condiciones críticas y de competencia-insatisfacción entre los distintos usos.

Se ha procedido al análisis integrado de los resultados de los estudios

- hidrológico, por lo que atañe a la caracterización de los regímenes naturales de los cursos de agua.
- agronómico, por lo que atañe a la entidad de la hidroexigencia neta de los cultivos en las áreas actualmente regadas con aguas superficiales;
- modelístico (modelo matemático lluvia-escorrentía), por lo que atañe a la caracterización hidrológica (valores históricos naturales reconstruidos en base temporal diaria) de los principales cursos de agua.

Se ha prestado particular atención en la evaluación de las utilizaciones (tomas) del recurso superficial. Se trata en efecto de un componente fundamental y delicado del balance que puede condicionar, aun significativamente, la fiabilidad de los resultados obtenidos. Los datos disponibles y utilizados han sido substancialmente los de fuente:

- INAPA, CAASD y Central Romana, por lo que concierne al abastecimiento de las redes de acueductos;
- INDRHI, Unidad Manejo de Tierras y Aguas, por lo que concierne a los valores del caudal de operación y de la eficiencia global de riego de los principales sistemas de riego (se recuerda que la eficiencia global de riego es estimada mediante el producto de: eficiencia de conducción del canal principal; eficiencia media de distribución, que abarca la eficiencia de conducción del canal principal en su tramo de distribución y la eficiencia de distribución en laterales desde el canal principal; eficiencia de aplicación de agua en el campo);
- CDE e INDRHI, por lo que concierne a las características hidráulicas de las presas (embalses) existentes.

Como se ha dicho anteriormente, la evaluación del balance hídrico entre oferta natural de los sistemas hidrológicos y actual nivel de las tomas de nuestro recurso hídrico (con relación al sector de riego se han considerado los valores de la hidroexigencia bruta, teniendo en cuenta la eficiencia global de riego, y/o del caudal de operación en cuanto representan el recurso efectivamente derivado, aunque mayor que la cantidad de agua efectivamente necesaria para los cultivos en condiciones de eficiencia optimal) ha sido referida a condiciones hidrológicas promedio y de sequía, con tiempo de retorno de 10 años, siendo estas últimas representativas de las situaciones de mayor criticidad en términos de recurso aprovechable. Del cotejo planteado de esta manera es posible definir

para cada sistema fluvial de interés el actual nivel de solicitación antrópica y la verificación de posibles situaciones de riesgo de insatisfacción de los distintos usuarios y de comprometimiento del medio ambiente consiguiente a valores reducidos de la escurrentía residual en el cauce.

Con respecto al impacto de las actuales utilizaciones sobre la escurrentía mínima residual en el cauce, se suministran indicaciones tanto sobre el posible valor mínimo del caudal ecológico, sobre la base sólo de consideraciones de tipo hidrológico como, donde la información disponible era suficiente, sobre el nivel actual de posible criticidad ambiental a través del cotejo entre valores medidos del caudal mínimo en el cauce y valores de posible referencia del caudal ecológico.

6.11 Cartografía temática

6.11.1 Realización de cartografía hidrogeológica

En el curso del proyecto, para cada una de las áreas objeto de estudio se ha preparado una cartografía hidrogeológica en escala 1:50.000 (Mapa 9/1 para la Planicie Costera Oriental) que ha constituido una síntesis de actividades que han involucrado a personal especializado en hidrogeología, fotogeología y técnicas informáticas de elaboración cartográfica.

A partir del examen de la bibliografía y de la cartografía existente, se ha procedido a una verificación sistemática de la geología mediante:

- Inspecciones preliminares.
- Fotointerpretación a partir de fotos aéreas.
- Controles de terreno.

La definición de un cuadro geológico de mayor fiabilidad, contextualmente a las informaciones hidrogeológicas adquiridas en el curso del trabajo de campo, ha permitido proceder a la sucesiva caracterización hidrogeológica.

Los criterios de referencia (UNESCO, 1970) han sido seguidos en líneas generales; sin embargo la complejidad y la articulación de las características sobre todo del medio poroso y de los acuíferos que pueden remontarse a las formaciones carbonáticas del sistema arrecifal, han sugerido la oportunidad de una articulación de la clasificación mucho más compleja con subdivisión del territorio sobre la base de las siguientes clases hidrogeológicas:

- Formaciones porosas: acuíferos de permeabilidad muy alta y muy productivos.
- Formaciones porosas: acuíferos de permeabilidad variable y productividad media.
- Formaciones porosas: acuíferos de permeabilidad variable, pero normalmente poco productivos.
- Formaciones fisuradas: acuíferos extensos y productivos (permeabilidad a menudo alta).
- Formaciones fisuradas: acuíferos locales o discontinuos (permeabilidad moderada o variable).
- Acuíferos en caliza arrecifal organógena de permeabilidad elevada de origen primario y/o secundario.
- Acuíferos en caliza arrecifal con litofacies detrítica de permeabilidad de variable a buena, esencialmente de origen primario.
- Acuíferos en sucesiones terrígeno-carbonáticas, donde el componente terrígeno es predominante. Permeabilidad localmente buena.
- Formaciones no acuíferas o con acuíferos muy locales.

Para conocer los detalles, remitimos al Anexo 18 y, para una síntesis, al párrafo 7.1.1.

La cartografía en examen completa el cuadro de las informaciones de relevancia hidrogeológica por lo que se refiere a:

- Pozos, distinguidos por tipología (excavados y perforados), por características del

acuífero afectado (freático, artesiano no surgente y artesiano surgente) o bien por resultado final (pozos secos).

- Sondeos.
- Manantiales.
- Piezometría.
- Divisorios de aguas subterráneas.
- Límites de áreas artesianas.

Por lo que se refiere a los aspectos hidroquímicos, se ha decidido suministrar las informaciones relativas a la concentración de los cloruros, en cuanto son indicativas del estado de comprometimiento del sistema subterráneo sobre todo con referencia a los problemas de intrusión de la cuña salina a lo largo de las áreas costeras.

A fin de suministrar un producto más completo, la cartografía presenta, además, los elementos de mayor relevancia de la red hidrográfica (ríos perennes, estacionales e intermitentes), comprendiendo lagos, lagunas saladas y embalses. El cuadro está completado por la red de canalización, que en algunos sectores resulta particularmente desarrollada.

En el respeto de los objetivos generales del proyecto, todo el trabajo llevado a cabo ha sido objeto de una informatización completa en plataforma software ArcView -PcArcInfo. Se ha desarrollado la interfase hacia el banco de datos de proyecto, a fin de permitir la representación y la interrogación de los elementos adquiridos sobre todo en el curso de las campañas de monitoreo. Todo lo relativo a la caracterización geológica, tectónica, hidrogeológica e hidrológica ha sido objeto de un proceso completo de digitalización y reconstrucción topológica, e integrado plenamente en el sistema informativo.

6.11.2 Realización de cartografía de vulnerabilidad

La creciente conciencia de que los cuerpos hídricos subterráneos no constituyen una reserva ilimitada, y el progresivo decaimiento cualitativo de las aguas de napa, tanto en naciones de elevada industrialización como en aquéllas de reciente y rápido crecimiento económico, han rendido urgente la necesidad de reducir el impacto ambiental de las actividades antrópicas sobre los recursos hídricos.

En esta óptica la comunidad científica, sobre la base de apropiados elementos de caracterización de los contextos físicos locales, ha elaborado en las últimas décadas algunos métodos de evaluación de los riesgos de contaminación de las aguas subterráneas, con la finalidad específica de planificar las actividades que se realizan en el territorio.

En este sentido se hace necesario introducir el concepto de *vulnerabilidad* de un acuífero, entendiendo, específicamente, como *vulnerabilidad intrínseca* la susceptibilidad de las aguas subterráneas de ser alcanzadas, y sucesivamente difundir, un agente contaminador procedente de la superficie. Tal definición prescinde del real contexto de riesgo ambiental y no considera, por lo tanto, la existencia de potenciales fuentes de peligro, las cuales podrían transformar esta “aptitud” de los acuíferos en un riesgo real de deterioro de la calidad de los recursos hídricos subterráneos.

La representación cartográfica conjunta de los centros de peligro potencial y de la vulnerabilidad intrínseca, conocida mejor como cartografía de *vulnerabilidad integrada*, posee el mérito evidente de dar un cuadro de referencia para la programación más

completo respecto de la mera representación solamente de la vulnerabilidad intrínseca. A esta cartografía pertenecen los mapas de vulnerabilidad realizados, en escala 1:100000, en el ámbito del proyecto.

La posibilidad de que un agente contaminador pueda alcanzar las napas subterráneas, y ser propagado por éstas, es función del sistema físico de la zona, cuya reconstrucción requiere necesariamente una cantidad de informaciones (estratigrafías detalladas, características hidrodinámicas de los acuíferos, desarrollo y tipología de los suelos, etc) no siempre disponibles y cuyo hallazgo no puede proponerse a veces en términos de costos y tiempos.

Por estas razones se recurre al auxilio de métodos de multicriterio mediante los cuales se logra, a través de un sistema de opiniones y valores atribuidos a parámetros físicos distintos (infiltración, tipo de suelo, etc), caracterizar al sistema hidrogeológico examinado, aun con un conocimiento general del mismo sistema físico.

Estos métodos estandarizados, aun necesitando de todas maneras selecciones subjetivas, con relación tanto a la densidad como a la calidad de las informaciones disponibles, que limitan métodos rigurosos o de todas maneras unívocos, permiten, mediante oportunas extrapolaciones e interpretaciones, la comparación entre áreas distintas, definidas sobre la base de la diferente vulnerabilidad.

De las distintas metodologías disponibles, la adoptada en este proyecto, denominada DRASTIC, resulta ser la más ampliamente difundida.

La metodología DRASTIC constituye un método paramétrico que permite, mediante índices numéricos, una evaluación estandarizada de la susceptibilidad a la contaminación de las aguas subterráneas para cargas generales de agentes contaminadores localizables en la superficie,

Una clave del éxito de este método reside además en la facilidad, ofrecida por la evaluación en términos numéricos, de representar cartográficamente la vulnerabilidad misma.

Este método, puesto a punto por la U.S.EPA (United States Environmental Protection Agency) en 1985, debe su denominación al acrónimo derivado de las iniciales inglesas de los siete parámetros considerados como los principales en el control del movimiento de las aguas en los terrenos naturales. Éstos son:

- **D** (Depth of water) - Profundidad al acuífero
- **R** (Recharge Net) - Recarga neta
- **A** (Aquifer Media) - Tipo de acuífero
- **S** (Soil Media) - Tipo de suelo
- **T** (Topography) - Topografía, Pendiente
- **I** (Impact of vadose zone) - Impacto del tipo de zona vadosa
- **C** (Conductivity) - Conductividad hidráulica

D Profundidad al acuífero

Representa el espesor de los depósitos que el flujo contaminador debe atravesar antes de alcanzar efectivamente el acuífero. Mayor es la subyacencia, mayor es el tiempo necesario al agente contaminador para llegar a la napa y por lo tanto mayores serán los procesos de atenuación del agente contaminador mismo por dilución, dispersión, filtración mecánica, etc.

R Recarga neta

Representa la infiltración eficaz por unidad de superficie, es decir el volumen de agua meteórica que se infiltra en el suelo por unidad de superficie, al neto de las pérdidas por escorrentía superficial y por evapotranspiración.

Incide sobre la vulnerabilidad dado que el agua representa el agente de transporte de los contaminadores desde la superficie hasta la napa, por lo cual, cuanto mayor es la cantidad de agua que llega a la napa por infiltración, tanto mayor es su vulnerabilidad por la posible difusión de contaminadores.

A Tipo de acuífero

Representa las características del acuífero, en particular la capacidad del medio poroso y/o fracturado de transmitir el contaminador. Ejercita un control importante sobre la longitud del recorrido seguido por el contaminador y sobre la dirección que éste toma, sufriendo ésta la influencia de las variaciones granulométricas y/o de la distribución y orientación de las discontinuidades. De estos elementos dependen los procesos de autodepuración.

S Tipo de suelo

Representa la capacidad de los suelos de oponerse a la movilización convectiva y/o difusiva de la sustancia contaminadora. Debe entenderse como la cobertura superficial de la zona vadosa (1.5 ÷ 1.8 m) e influye tanto sobre la cantidad de agua que puede infiltrarse y alcanzar los niveles que se encuentran por debajo, vehiculando posibles contaminadores, como, donde ésta es bastante espesa, sobre la autodepuración del contaminador por procesos ligados a la filtración, biodegradación y adsorción.

T Topografía

Representa la pendiente de la superficie topográfica, sobre la base de la cual la escorrentía está favorecida o bien impedida. Influye sobre el tiempo de permanencia y sobre la velocidad de flujo del agua de lluvia que llega al terreno reduciendo o incrementando la disponibilidad de agua para la infiltración.

I Impacto del tipo de zona vadosa

Es la zona comprendida entre el suelo (cuando está presente) y la superficie de la napa, donde se realizan procesos de biodegradación, filtración mecánica, reacciones químicas, dispersión, etc.

Este factor influye sobre la dirección seguida por el contaminador para llegar a la napa y, más en general, sobre los procesos de autodepuración de las aguas.

C Conductividad hidráulica

La conductividad hidráulica del acuífero controla la velocidad con la cual las aguas subterráneas fluyen en el medio permeable saturado, bajo un determinado gradiente piezométrico. Ésta depende de numerosos factores, como la granulometría, el estado de condensación, la presencia de elementos estructurales, o discontinuidades en general.

En la aplicación del método, a cada uno de estos factores, relativamente a las clases de variación consideradas, se le ha atribuido un puntaje (rating) a multiplicar sucesivamente por un peso (weight) atribuido por convención al factor mismo.

Los puntajes rinden cuenta de las condiciones de seguridad garantizadas por el factor considerado, que se reducen con el crecimiento del valor numérico.

Los pesos atribuidos a cada uno de los factores DRASTIC varían en función de la importancia con la cual concurren a la vulnerabilidad intrínseca de un acuífero.

A los factores se les atribuyen generalmente los siguientes pesos:

D 5 - R 4 - A 3 - S 2 - T 1 - I 5 - C 3

La vulnerabilidad potencial de los acuíferos está expresada bajo la forma de índice numérico (*Índice DRASTIC*) que se obtiene de la expresión:

$$\sum_i r_i w_i$$

con r_i representativo del puntaje y w_i del peso relativos al factor considerado.

Mayor es el valor de este índice y mayores resultan ser las condiciones de vulnerabilidad del acuífero en el sector considerado.

Sobre la base de los puntajes previstos y de los pesos atribuidos a los factores considerados, el campo teórico de los índices DRASTIC en las seis áreas de estudio está comprendido entre 26 – 221.

Este intervalo resulta levemente reducido respecto de la extensión del método estándar (23-226) debido a algunas modificaciones introducidas en la atribución de los puntajes, de las cuales se dará una explicación más adelante.

Sobre la base del campo de variación arriba citado se definieron de esta manera las siguientes clases de vulnerabilidad:

<i>Vulnerabilidad</i>	<i>Índice Drastic</i>	
	muy baja	23 - 64
baja	65 - 104	
intermedia	105 - 145	
alta	146 - 185	
muy alta	186 - 221	

La parcial indisponibilidad de los datos relativos a algunos factores limitó la evaluación de vulnerabilidad a áreas reducidas respecto de la extensión de la zona de estudio como está delimitada en la cartografía hidrogeológica de proyecto (Mapa 9/1). El área evaluada, respecto del área de estudio, excluye los primeros contrafuertes de la cordillera, y corresponde estrictamente a la planicie costera, en su extensión desde Santo Domingo hasta la entera parte oriental, comprendiendo tanto las mesetas que unen el área metropolitana de la capital al valle del Río Nizao al O, como la ramificación NE que desde el río Anamuya se desarrolla hacia el N hasta el río Nisibón.

Mientras que, en efecto, para algunos factores la densidad de los datos no implicó limitaciones espaciales a su evaluación (R, A, I y T), en el caso de D y S no estaban disponibles, desdichadamente, datos suficientes a no ser para sectores arealmente más contenidos.

La Conductividad hidráulica (C), constituyó un caso particular: en términos rigurosos este factor resultó ser el de mayor indeterminación por la ausencia generalizada de datos. El artificio necesario de ligar este factor a los puntajes que se atribuyen generalmente en la literatura a litofacies acuíferas análogas permitió no obstante extender su evaluación a toda el área de estudio.

De esta manera la extensión de las áreas sometidas a evaluación de vulnerabilidad resultó estar vinculada a la existencia de los datos relativos a los factores D y S, o por lo menos a

la posibilidad de efectuar una evaluación aceptable de los mismos.

Sobre la base de estas premisas, en la cartografía de vulnerabilidad realizada se mantuvieron distinguidas las áreas de mayor atendibilidad de atribución, para las cuales estaban disponibles los datos relativos a todos los factores considerados, respecto de aquéllas donde se debió forzar de todos modos la interpretación de por lo menos uno de los factores D y S.

La producción cartográfica se realizó a través de un GIS (ARCVIEW de la ESRI) conectado con el Banco de Datos de Proyecto, que suministró, directamente o indirectamente, los valores relativos a algunos de los factores necesarios para la aplicación del modelo DRASTIC.

Para los factores que no podían derivarse automáticamente del Banco de Datos, la adquisición de los mismo requirió su informatización y la creación de archivos gráficos específicos.

La elaboración computada mediante GIS permite una buena integración entre datos de distinta tipología. En efecto, los niveles característicos del DRASTIC prevén el empleo de datos tanto puntuales, como los derivados de sondeos, como lineales, como curvas de nivel, y areales, como los texturales o de recarga.

El método informático aplicado a este tipo de modelo prevé una subdivisión del territorio de estudio según una grilla de unidades espaciales elementales que, en el caso específico, se definió de malla regular cuadrada de 200 m de lado. Este valor resultó ser el mejor compromiso entre densidad de los datos y detalle de representación.

Desde un punto de vista estrictamente conceptual cada uno de los parámetros analizados requirió un planteo específico que puede sintetizarse de la siguiente manera:

D Profundidad al acuífero

En el caso de disponibilidad de superficies piezométricas regionalizadas, el valor de la subyacencia se obtuvo directamente por sustracción de la superficie topográfica, como se la reconstruyó mediante DTM.

Cuando en cambio la densidad de las medidas no resultó suficiente para reconstruir con fiabilidad la piezometría local, se procedió a una atribución areal directa de la clase de profundidad en los casos en los cuales los datos disponibles, tanto topográficos como de subyacencia local obtenida de medidas directas, no permitiesen incurrir en errores sustanciales de evaluación

Los datos utilizados fueron los relativos a los niveles piezométricos medios, medidos en los pozos pertenecientes a la red de control piezométrico.

Las simplificaciones introducidas en la regionalización de los datos piezométricos y el paso más bien ancho entre las isohipsas, rindiendo veleidoso el intento de diferenciación ulterior por debajo de los 5 metros de subyacencia, hicieron indispensable simplificar las clases llevándolas a 4 respecto de las 7 previstas originalmente.

Las clases adoptadas, con los puntajes relativos, están sintetizadas en la tabla siguiente:

<i>Rango de profundidades (m)</i>	<i>Puntajes</i>
0 – 5	9
5 – 15	6
15 – 30	3
> 30	1

R Recarga neta

Los datos utilizados son los obtenidos de las elaboraciones del Anexo 14 (“Evaluación de la recarga en las zonas hidrogeológicas de interés”).

Los valores de infiltración eficaz se obtuvieron considerando subzonas homogéneas tanto en términos de precipitaciones medias anuales como por constitución litológica. A los fines del cálculo de la infiltración eficaz, las metodologías adoptadas, para las cuales se remite directamente al informe arriba citado, fueron diferenciadas en función de la disponibilidad y características de los datos meteorológicos de partida.

En la evaluación de la vulnerabilidad se utilizaron los valores calculados por año promedio de la tasa de recarga pluvial directa (recarga neta).

Los valores de las precipitaciones varían levemente desde el Oeste hacia el Este con disminuciones, por lo menos limitadamente a los sectores con igual cota, del orden de pocos centenares de mm/año. Como es obvio, las variaciones con la cota resultan en cambio más sensibles, con diferencias entre el fondo del valle y los más altos relieves marginales de más de 500 mm/año. Estando sin embargo los sectores investigados confinados principalmente en las cotas más bajas, en un contexto de las precipitaciones delineado de esta manera, el factor litológico juega el papel fundamental en determinar, de manera casi sistemática, la clase de recarga neta de pertenencia; los valores más elevados están atribuidos en efecto a los sectores de pertinencia de los depósitos aluviales actuales y recientes de los ríos principales (río San Juan, río Macasía), mientras que para las áreas de afloramiento de las secuencias pelítico-margosas neogénicas (Formaciones Sombrerito y Trinchera) la recarga neta es casi nula.

Las clases de variación consideradas para este factor corresponden a las canónicas y están sintetizadas en la tabla siguiente:

<i>Recarga neta (mm/año)</i>	<i>Puntajes</i>
0 – 50	1
50 – 100	3
100 – 175	6
175 – 250	8
> 250	9

A Tipo de acuífero

Los puntajes asignados a los litotipos acuíferos corresponden a las evaluaciones estándares propuestas por la metodología DRASTIC.

Con relación a los acuíferos pertenecientes al sistema arrecifal de la planicie, los puntajes asignados consideraron la distinción entre las facies detríticas interiores y las facies frontales principalmente organógenas. En el caso de las facies interiores, las sucesiones entre niveles de distinta granulometría, variables desde las ruditas hasta las pelitas, fueron asimiladas, en términos de puntaje, a los acuíferos aluviales mixtos, y se les asignó el valor 6. Este mismo valor fue atribuido también a los depósitos de las mesetas occidentales.

Para la dorsal organógena el valor asignado generalmente fue igual a 7, incrementado a 10 para los sectores con desarrollo consistente de fenomenologías kársticas.

En el interior de Santo Domingo, en los sectores de desarrollo consistente de depósitos cuaternarios terrígenos (q' de la cartografía hidrogeológica), la progresiva disminución de la granulometría de los sedimentos en dirección de los relieves de la cordillera, y la coincidente reducción de los episodios calcáreos en el interior de la sucesión, indujo a diferenciar el acuífero en una zona más interna, con valores variables entre 4 y 5, y una zona externa, con el puntaje usual igual a 5, con límites obtenidos a partir de la

morfología piezométrica (variación brusca del gradiente).

A los depósitos aluviales presentes en el área se les asignó el valor 6, diferenciando sólo el valle aluvial del río Haina, por causa de una granulometría de los sedimentos decididamente más gruesa. A tal propósito, se estimó congruo asignar el valor 6 también a los acuíferos aluviales de los ríos Ozama e Isabela, no obstante un desarrollo consistente de arcillas en la porción superficial de los depósitos del valle.

A los exiguos afloramientos litoides precuaternarios (vulcanitas s.l., ultrabasitas, calizas y conglomerados) que se observan en el sector al N de Santo Domingo, entre Yamasa y Monte Plata, se les asignó un puntaje estándar (6) extendido a los sectores circundantes para los cuales se evaluó un desarrollo reducido de las coberturas cuaternarias.

En síntesis, para este parámetro se adoptaron los siguientes puntajes:

<i>Tipo de acuífero</i>	<i>Puntajes</i>
Depósitos aluviales	6-(7)
Depósitos cuaternarios s.l.	4-5-6
Formaciones litoides precuaternarias	6
Sistema de plataforma carbonática - Facies organógenas predominantes	7
Sistema de plataforma carbonática - Facies organógenas predominantes, karstificadas	10
Sistema de plataforma carbonática - Facies detríticas predominantes	6

S Tipo de suelo

Para la definición de este factor se emplearon las clasificaciones texturales de los suelos realizadas en el ámbito del proyecto mismo y representadas en el Mapa 7 (Mapa de las áreas irrigadas y de la susceptibilidad a la irrigación).

La clasificación textural logra cubrir casi por entero al área sometida a la evaluación de vulnerabilidad. En los sectores no determinados se procedió, compatiblemente con las observaciones hechas en el terreno, con la conformación morfológica de las áreas y con la naturaleza de los litotipos que afloraban, o a la extrapolación a partir de las clases texturales adyacentes o a la interpretación de la clase de suelo más plausible a atribuir.

En tal sentido, las asunciones más importantes están representadas por la asignación del valor 10 a las vastas zonas calcáreas próximas a la costa, donde se observa un desarrollo edafológico avanzado, y del valor 6 a los afloramientos al O del río Haina, donde las granulometrías observadas hacen pensar que sea plausible el desarrollo de suelos con esqueleto arenoso abundante.

En cambio, la constitución presumiblemente fina de los reducidos sectores de cuaternario terrígeno cercanos a la costa (La Granchorra y laguna de Bávaro), no clasificados texturalmente, indujo a atribuir a estas áreas puntajes más contenidos, comprendidos entre 1 y 3.

En la tabla siguiente están resumidos los puntajes relativos a todas las clases texturales de los suelos según lo determinado en el curso del proyecto.

<i>Suelo</i>		<i>Puntajes</i>
ausente o bajo	SB	10
esquelético arenoso	ScSa	10
arenoso	Sa	9
esquelético fisurado franco	ScFeFr	8
franco arenoso pedregoso	FrSaPi	7

esquelético franco arenoso	ScFrSa	7
fisurado franco	FeFr	7
franco arenoso	FrSa	6
esquelético franco	ScFr	6
franco	Fr	5
esquelético fisurado arcilloso	ScFeAr	5
franco arcilloso limoso fisurado	FrArLiFe	5
franco arcilloso pedregoso	FrArPi	4
esquelético franco arcilloso	ScFrAr	4
fisurado arcilloso	FeAr	3
franco arcilloso	FrAr	3
esquelético arcilloso	ScAr	3
esquelético arcilloso limoso	ScArLi	3
arcilloso limoso pedregoso	ArLiPi	2
arcilloso	Ar	1

T Topografía

Las clases de escarpadura se obtuvieron partiendo de la vectorialización de las isohipsas, utilizadas para la reconstrucción de un Modelo Digital del Terreno (DTM) con malla de discretización 200 x 200 m, del cual se obtuvo, mediante un algoritmo de derivación la pendiente de pertinencia de cada una de las celdas.

Los intervalos considerados para las clases de escarpadura y los relativos puntajes asignados, en perfecta adherencia con las asignaciones standards, están sintetizados en la tabla siguiente.

<i>Pendiente (%)</i>	<i>Puntajes</i>
0 – 2	10
2 – 6	9
6 – 12	5
12 – 18	3
> 18	1

I Impacto del tipo de zona vadosa

Utilizando las recomendaciones y los puntajes standards del método DRASTIC, en el sector considerado se asignaron los siguientes puntajes:

<i>Litología del no saturado</i>	<i>Puntajes</i>
Depósitos aluviales	3-5-6-7
Depósitos cuaternarios s.l.	3-4-5-6
Formaciones litoides precuaternarias	6
Sistema de plataforma carbonática - Facies organógenas predominantes	8
Sistema de plataforma carbonática - Facies organógenas predominantes, karstificadas	10
Sistema de plataforma carbonática - Facies detríticas predominantes	5-6
Sistema de plataforma carbonática - Facies detríticas predominantes con supuestas	6-7

formas kársticas sepultadas

En el caso del sistema carbonático de la Planicie, se hizo una primera distinción dentro de las facies predominantemente organógenas de la franja costera, distinguiendo las áreas con intensa karstificación (10) de las demás (8).

Las facies detríticas interiores del sistema fueron a su vez diferenciadas: en el sector al O del río Casuí, por causa del verificado desarrollo de una cobertura arcillosa superficial residual., los valores asignados variaron entre 5 y 6, con este último valor atribuido sólo a los sectores con existencia de numerosas depresiones superficiales, tales que recordaban, como mera hipótesis, los efectos de la presencia de formas kársticas subsuperficiales. Sobre la base de esta consideración, en la parte ubicada al E del río Casuí, con cobertura residual más contenida o ausente, los puntajes relativos fueron incrementados de una unidad para ambas tipologías.

La asignación de los puntajes, en función de las granulometrías superficialmente predominantes es decididamente variada también para los depósitos aluviales, con atribuciones que varían entre los 7 de los más gruesos de Haina, Higuamo, Magua, Chavón, a los 3 del predominantemente arcilloso río Ozama, pasando por los 5 del río Higuero y a los 6 de los restantes ríos (Duey, Maimón, partes terminales del Soco y menores).

También el cuaternario s.l. fue distinguido, en términos de puntaje asignado, de manera que se tuviese en cuenta la variabilidad granulométrica total del espesor aireado. En tal sentido la franja al interior de la capital, con episodios calcáreos intercalados, se consideró con puntaje 3 (abundantes facies pelíticas lacustres), mientras que las zonas ubicadas más al interior, considerando un incremento progresivo de las granulometrías al acercarse a los relieves, fueron clasificadas por franjas con puntajes en aumento de 4 a 5. El cuaternario terrígeno de la cuenca al S de Salvaleón de Higüey fue mosaicado en los puntajes en función de los espesores, resaltados por la presencia o no de reflejos superficiales de formas kársticas sepultadas. Para las áreas con espesores presumiblemente superiores el puntaje atribuido fue igual a 4, aumentado a 5 en correspondencia de espesores más exiguos, hasta 6 en la ramificación al E del Batey Campo Nuevo, donde la superposición ocurre sobre un substrato de elevada karstificación.

Todas las formaciones litoides precuaternarias fueron consideradas con un puntaje generalizado igual a 6.

C Conductividad hidráulica

La escasez de datos relativos a este factor, no permitió una atribución canónica de los puntajes, es decir basada en los valores efectivos de conductividad hidráulica de los acuíferos.

Recordando que los campos de variación considerados en la metodología DRASTIC son extremadamente restringidos, comprendidos entre 7.10^{-5} y 9.10^{-4} en los campos intermedios, resulta claro que, faltando una suficiente densidad de datos al respecto, la variabilidad de este parámetro también en contextos aparentemente análogos no permitió más que una estimación general sobre la base de cuanto era posible obtener para varias tipologías de acuífero de la literatura específica.

Desde el punto de vista operativo se atribuyeron directamente puntajes en función de la facies acuífera, incrementando o reduciendo los puntajes de referencia en el caso en que estuviesen presentes elementos que se consideraba que pudiesen influir sensiblemente sobre la permeabilidad del mismo acuífero (karsismo, fracturación, granulometría, abundancia de la matriz en terrenos sueltos, etc.).

En el caso específico del sector de estudio a los acuíferos calcáreos karstificados del área

se les asignó un puntaje generalizado igual a 10, diferenciándolos respecto de las facies calcáreas predominantemente organógenas no karstificadas (6).

Para las facies calcáreas detríticas de las zonas interiores el puntaje asignado fue redimensionado a 4, así como para los depósitos aluviales de los ríos Ozama e Higuero.

En general a los depósitos aluviales se les asignó en cambio un puntaje más alto, igual a 6.

El valor más bajo atribuido , 2, se consideró como el más apto para caracterizar a la franja de depósitos cuaternarios finos, con intercalaciones de origen carbonático, que se desarrollan en el interior de Santo Domingo, así como los acuíferos constituidos por las formaciones litoides precuaternarias de los relieves marginales.

La síntesis de los puntajes atribuidos es la siguiente:

<i>Facies acuíferas</i>	<i>Puntajes</i>
Depósitos aluviales	(4)-6
Depósitos cuaternarios s.l.	2
Formaciones litoides precuaternarias	2
Sistema de plataforma carbonática – Facies organógenas predominantes	6
Sistema de plataforma carbonática - Facies organógenas predominantes, karstificadas	10
Sistema de plataforma carbonática - Facies detríticas predominantes	4

Los puntajes obtenidos para cada uno de los factores, permitieron la redacción del mapa de vulnerabilidad en escala 1:100000 (Mapa 10/1), en el cual, además de la clasificación en términos de clase de vulnerabilidad intrínseca, están indicados también los centros de peligro potencial censados en el área de estudio.

En las Figs. 6.11.2/1 y 6.11.2/2 de la Memoria 6 (Península Sur de Barahona) están visualizados como ejemplificación los escenarios relativos a cada uno de los factores que concurren a la evaluación total de vulnerabilidad.

6.12 Modelización

6.12.1 Modelos matemáticos de flujo de las aguas subterráneas y de la intrusión marina

Se ha implementado un modelo matemático bidimensional de flujo, mediante el código de cálculo de diferencias finitas Modflow, como cobertura del sector que desde el Distrito Nacional (Santo Domingo – Monte Plata) se extiende hacia la extremidad oriental del área de estudio (Bavaro – Punta Cana).

El modelo se calibró en condiciones estacionarias, teniendo como referencia la piezometría promedio del período 9/97-9/98. La actividad de calibración se articuló a partir de un modelo conceptual inicial más bien aproximado, considerando la extensión del área de estudio, la falta de informaciones exhaustivas sobre las propiedades hidrogeológicas, la indeterminación inherente a los espesores del sistema acuífero y en general de los demás parámetros objeto de examen. La actividad se concluyó cuando se alcanzaron objetivos de calibración satisfactorios, en términos de concordancia entre piezometría observada y calculada; el resultado fue la definición del modelo conceptual final y del

modelo numérico, a utilizarse para los fines de la simulación.

En síntesis, el modelo conceptual final se caracteriza por formaciones que van aumentando de espesor desde el límite N (a lo largo de la Cordillera Oriental) hacia el S (línea de costa), hasta valores máximos hipotetizados del orden de los 500-600 m. Análogamente, también las permeabilidades van aumentando hacia el S, pasando de las formaciones finas predominantemente arcillosas del área de Monte Plata (en el límite NO del área de estudio), a los depósitos de retroarrecife y a las calizas arrecifales, a lo largo del mar Caribe. Se trata de variaciones considerables, iguales a 2-3 órdenes de magnitud. Se pusieron en evidencia el papel fundamental de los intercambios con la red hídrica superficial y la existencia de condiciones particulares de flujo a lo largo de lineamientos preferenciales (fracturas, sistemas de grutas), imputables a fenómenos kársticos o quizás tectónicos. Por lo que atañe a la recarga, se hizo referencia a los resultados del estudio hidrológico, adoptando sustancialmente valores elevados e intermedios en correspondencia de las calizas arrecifales y de las zonas de retroarrecife, y valores muy reducidos en correspondencia de las formaciones más finas del sector de Monte Plata.

El modelo se integró con la individualización de las tomas para usos potables (campos pozos de Santo Domingo, San Pedro de Macorís, La Romana, entre los principales), para usos turísticos (áreas de Boca Chica - Juan Dolio – Guayacanes, La Romana, Bavaro – Punta Cana) y agrícola, aun siendo estos últimos de entidad mínima a la luz de la predominancia de los cultivos secos (caña de azúcar).

Una sucesiva actividad de modelización se refirió a la extensión del modelo a condiciones transitorias en un período de 30 años de duración. No se trató sin embargo de una calibración propiamente dicha, dado el número exiguo de informaciones acerca de los coeficientes de almacenamiento y sobre todo la falta total de datos históricos de piezometría y de toma.

Para las simulaciones de la intrusión marina, se ha utilizado el simulador numérico de reservorio TOUGH2 (Pruess, 1991; Pruess et al. 1999), código de cálculo 3D de diferencias finitas integrales, saturado/no saturado y densidad dependiente. Entre los módulos termodinámicos disponibles en TOUGH2, se ha elegido el módulo EWASG (Battistelli et al., 1997) que permite la simulación del flujo multifásico de mezclas constituidas por agua, cloruro de sodio y un gas no condensable, el aire para esta aplicación específica.

Considerando las limitaciones arriba expuestas y el grado de detalle alcanzado en la caracterización del fenómeno, la simulación numérica de la intrusión marina ha sido llevada a cabo:

- efectuando simulaciones numéricas en secciones verticales, en geometría 2D, colocadas transversalmente a la línea de costa y aproximadamente perpendiculares a las isopiezas;
- utilizando mallas de discretización cartesianas bidimensionales con pasos en sentido horizontal y vertical aceptables desde el punto de vista de la onerosidad de la solución numérica y tales que diesen una descripción suficiente del fenómeno.

En el ámbito de la Planicie Costera Oriental, se ha querido investigar dos distintas situaciones con dos modelos en sección vertical:

- al oeste de San Pedro de Macorís, se ha querido simular la intrusión marina en una zona caracterizada por limitadas extracciones pero con una piezometría

extremadamente deprimida, con isopieza de 1 m s.n.m. a una distancia de aproximadamente 20 km del mar;

- al este de Santo Domingo, se ha querido simular el fenómeno de la intrusión marina en un área caracterizada por fuertes extracciones y por una piezometría que conserva aún a 20 km de distancia del mar un nivel superior a 5 m s.n.m.

El cuadro hidrogeológico reconstruido en el ámbito del presente proyecto, como así también los datos específicos relativos a la posición de la interfase agua dulce – agua salobre, ha permitido una calibración de los modelos de intrusión salina sólo con referencia a la situación actual observada. Los modelos calibrados han sido utilizados para predecir la evolución futura del fenómeno según varias hipótesis de explotación futura del acuífero.

6.12.2 Utilización conjunta de las aguas subterráneas y superficiales

6.13 Ensayos de recarga inducida

El Estudio Hidrogeológico Nacional tiene dentro de sus actividades la individuación de sitios idóneos para intervenciones de recarga inducida y la realización, en los sitios idóneos de ensayos de recarga inducida con el doble objetivo de minimizar, por una parte, el riesgo de avance de la intrusión marina frente a explotaciones actuales y futuras de aguas subterráneas y de evaluar, por otra, la viabilidad de regular caudales de ríos sin infraestructura hidrológica.

Los ensayos de recarga inducida se refieren a sistemas de recarga en superficie, es decir son de dos tipos: mediante acondicionamiento de cauces de ríos (dragado-escarificación del lecho del río y/o aumento de la superficie y del tiempo de contacto río-napa y/o ensanchamiento del cauce de crecida del río) y mediante balsas de recarga.

La actividad para la identificación de los sitios propuestos para la realización de los ensayos de recarga inducida ha sido desarrollada en las siguientes fases:

- en la oficina, individuación preliminar, de forma sintética, de las características del medio ambiente idóneas para realizar ensayos de recarga;
- en el campo, comprobación de la posibilidad de efectuar ensayos de recarga.

Con referencia a los objetivos del proyecto, se tomaron en consideración:

- el bajo curso de los ríos: Nigua, Haina, Ozama, Higuamo, Soco, Cumayasa, Dulce, Chavón, Duey (Yuma), Maimón y Anamuya, incluyendo por lo tanto las áreas (efectivas o presuntas) de avance de la intrusión marina;
- el río Yabacao (afluente en orilla izquierda del río Ozama) desde el puente aguas arriba del poblado de El Jobo hasta el puente cerca del poblado de Los Marenos y el río Tosa (afluente en orilla izquierda del río Brujelas) desde el puente cerca del poblado de La Estrella hasta el puente aguas abajo del poblado de Los Llanos, teniendo como objetivo específico aumentar la recarga natural de acuíferos explotados;
- el medio curso de los ríos Nigua, Soco y Cumayasa, para verificar la factibilidad de este tipo de obra.

Para el desarrollo del análisis preliminar, se han tenido en cuenta tanto los criterios básicos para el proyecto de los ensayos de recarga inducida en superficie (expuestos en detalle en el Anexo Memorias n° 21, cap. 2), como las informaciones de interés adquiridas en el estudio (con referencia a las características hidrológicas, hidrogeológicas e hidroquímicas de los ríos y acuíferos de las áreas de interés) y las indicaciones de técnicos del INDRHI por lo que se refiere en particular al régimen hidrológico y a la calidad de las aguas de los ríos (niveles de contaminación y existencia de intrusión de agua marina).

En particular los criterios básicos relativos a las condiciones del medio ambiente (sistemas superficial y subterráneo) idóneas y necesarias para la realización de los ensayos de recarga inducida, también para una mejor búsqueda en el campo y sucesivo análisis de las informaciones adquiridas, fueron así sintetizados.

- Recarga por medio de acondicionamientos de cauces de ríos:

1. el río alimenta la napa;
2. régimen hidrológico del río:

- permanente (recarga por medio de dragado-escarificación del lecho del río y/o aumento de la superficie y del tiempo de contacto río-napa;
 - 3. - efemérico (recarga por medio de ensanchamiento del cauce de crecida del río);
 - 4. el material del lecho está constituido preponderantemente por grava gruesa y cantos;
 - 5. valores del caudal suficientes para remover las partículas finas (en particular por obras de dragado-escarificación del lecho del río y aumento de la superficie y del tiempo de contacto río-napa);
 - 6. aguas con bajo valor de turbidez y de contaminación (en régimen hidrológico intermedio y/o de estiaje).
- Recarga por medio de balsas:
 1. existencia de terrenos llanos a distancia de 30-50 metros del lecho de crecida del río (de preferencia en correspondencia de la interfase agua dulce-agua salada, si se tiene también el objetivo específico de controlar la intrusión de agua marina);
 2. buena permeabilidad y granulometría media y lo más posible homogénea del medio no saturado;
 3. profundidad del nivel de las aguas subterráneas, desde el nivel del suelo, no superior a los 4-5 metros;
 4. régimen hidrológico del río permanente (para garantizar el abastecimiento de agua a la balsa);
 5. aguas con bajo valor de turbidez y de contaminación;
 6. tramo del río (donde se toma el agua) no interesado por intrusión de agua marina;
 7. tramo del río, cerca de la balsa, no alimentado por el acuífero, para evitar un regreso inmediato de las aguas infiltradas al tronco de valle del curso de agua, rindiendo de hecho vana la intervención misma.

Durante el desarrollo de la segunda fase, es decir la identificación en el campo de los sitios idóneos para realizar ensayos de recarga inducida en superficie, se han tenido en cuenta los criterios arriba expuestos comprobando en particular las características granulométricas del lecho de los ríos, la morfología (área casi llana) y la granulometría de los terrenos cerca del cauce de crecida, el nivel de contaminación de las aguas (es decir: sus características como color y olor, existencia de basurales urbanos e industriales cerca y/o en el interior del cauce de los ríos, etc.) y la facilidad de acceso.

La inspección ocular en los sitios de interés se desarrolló en los meses de julio, agosto y noviembre 1998.

7 RESULTADOS OBTENIDOS

7.1 Acuíferos y aguas subterráneas

7.1.1 Caracterización hidrogeológica de las diferentes formaciones geológicas

Las formaciones geológicas presentes en el área de estudio han sido caracterizadas desde un punto de vista hidrogeológico utilizando como base de clasificación las especificaciones de la leyenda UNESCO.(1970). Esta base ha sido necesariamente adaptada, articulándola ulteriormente, a fin de adecuarla aún más a las características de los sistemas estudiados.

Es oportuno recordar que, ya que las formaciones están caracterizadas en función de sus reales potencialidades (recursos explotables y luego combinación de los parámetros permeabilidad y recarga), depósitos parecidos por composición litológica se han considerado de manera diferente dependiendo de su propia posición estructural.

Quedando firme una mayor división, extendida a las distintas áreas de estudio, de las formaciones porosas que han sido agrupadas en tres clases distintas, por la, la tipología de los acuíferos de la Planicie Costera Oriental, que pueden remontarse a la presencia de facies carbonáticas del sistema arrecifal, y a la facies de transición a los depósitos terrígenos, no permitiendo una atribución unívoca a los grupos definidos por la leyenda UNESCO, ha hecho necesario introducir un nuevo grupo de clases dedicado exclusivamente al sistema en cuestión, a fin de superar la inadecuadez de la clasificación de referencia.

Dicha inadecuadez está ejemplificada por las biolitas costeras donde la porosidad primaria, pero no intersticial, se asocia a veces a sistemas de fallas y/o fracturas, a las cuales se sobreponen arealmente también los efectos de la disolución kárstica. También en los depósitos cuaternarios presentes al N de Santo Domingo, la alternancia de niveles terrígenos y estratos calcáreos, en función de las frecuencias relativas, otorga a estos acuíferos características de permeabilidad que degradan entre aquéllas propias de acuíferos permeables a aquéllas de acuíferos con permeabilidad por fracturación.

Tres distintas tipologías hidrogeológicas fueron identificadas para las formaciones porosas:

- Porosas, sede de acuíferos de permeabilidad alta y muy productivos. En este grupo hemos clasificado exclusivamente los depósitos aluviales gruesos que en esta área se asocian sólo a los ríos Nigua, Nizao y a los segmentos superiores del río Higuamo.
- Porosas, sede de acuíferos de permeabilidad variable y productividad media. Este grupo se refiere a la generalidad de los depósitos aluviales, tanto recientes como actuales, de granulometría media, presentes en toda el área de estudio, comprendiendo también los depósitos litorales presentes entre Bavaro y Punta Cana y los depósitos arenáceos débilmente litificados de la Formación río Nizao presentes en proximidad del río homónimo.
- Porosas, sede de acuíferos locales y discontinuos, de permeabilidad moderada o baja, poco productivos. En esta clase confluyen la casi totalidad de los depósitos cuaternarios sensu lato, tanto aluviales como eluviales, que constituyen la franja a los pies de la montaña al O del río Magua, y los depósitos de los dos ríos principales del sector occidental, el río Haina y el río Ozama.

Mientras que para estos últimos la asignación está legitimada por la tipología de los depósitos en el cauce que son, por lo menos superficialmente, de naturaleza predominantemente fina, en el caso de los depósitos cuaternarios s.l., que presentan

generalmente una cobertura superficial residual de granulometría fina, el grado de fiabilidad de dicha atribución, está condicionado claramente por la escasez de las informaciones geológicas que hay para tal área donde, por causa del intenso weathering y de la escasez de los afloramientos, la constitución geológica no resulta hasta el día de hoy suficientemente aclarada.

Esto significa que si generalmente los acuíferos de la zona no constituyen cuerpos hídricos de particular significatividad, no se debe excluir sin embargo que no estén presentes localmente acuíferos de productividad más elevada que por el momento no son individualizables.

Consideraciones parcialmente análogas pueden hacerse para la vasta zona casi llana presente al S de Higüey donde resulta difícil tener un cuadro claro del desarrollo de los depósitos cuaternarios de relleno de dicha cuenca interna.

Por más que sean parciales, las observaciones hechas en el terreno hacen que se considere que tales depósitos sean generalmente finos aunque el destino agrícola del área, asociado a la práctica, recurrente en toda la Planicie Costera, de utilizar detrito carbonático de vario tamaño en el acondicionamiento de las calles perimetrales, no permite profundizar su conocimiento (ver geología). La valencia hidrogeológica de toda la zona, asignada evaluando las potencialidades acuíferas de los depósitos cuaternarios de relleno, está claramente condicionada por el desarrollo vertical de los mismos; en los lugares de presumible desarrollo de una fenomenología kárstica sepultada, indicativa de exiguos espesores de la cobertura cuaternaria, a los fines de la evaluación hidrogeológica de estos sectores no puede despreciarse de todos modos la presencia, en caso de que ésta fuese confirmada, de terrenos carbonáticos a profundidades relativamente reducidas.

Por lo que se refiere a las formaciones fisuradas, éstas se localizan exclusivamente detrás de la llanura costera y caracterizan a toda la reducida franja de la Cordillera Central y Oriental incluida en el área objeto de investigación. Estas formaciones están constituidas por rocas litoides de origen predominantemente ígneo con subordinadas rocas carbonáticas.

El conjunto de estos litotipos, en función de su colocación geográfica y/o topográfica, y de todos modos mucho más allá de los que son los límites del área considerada, juega el papel fundamental de recarga de todo el sistema hídrico subterráneo de la Planicie Costera.

En función del diferente grado de fracturación, estos terrenos han sido agrupados en dos clases distintas:

- Fisuradas, sede de acuíferos extensos y productivos, de permeabilidad normalmente alta. Este grupo es el menos representado y está limitado a las formaciones litoides carbonáticas que afloran, por extensiones generalmente reducidas, en los relieves marginales.

Su distinción respecto del resto de las demás formaciones de la cordillera es función de su mayor grado de fracturación, y consiguiente mayor permeabilidad, que se observa generalmente en la escala del afloramiento, reflejando la distinta respuesta reológica de los litotipos calcáreos a la intensa y compleja historia tectónica que ha involucrado a todo el sistema de la Cordillera Central y Oriental.

Los afloramientos de extensión mayor son aquéllos presentes a algunos kilómetros en dirección N desde la población de Lechuga, para los cuales el contexto estructural, consistente en la presencia de sinclinales, cuyo núcleo está constituido por las mismas formaciones carbonáticas, parece incrementar sus potencialidades hidrogeológicas.

Otro afloramiento de dimensiones comparables es el que corre en forma de estrecha dorsal en el límite occidental de la ramificación N del área de estudio, aproximativamente desde la altura del río Maimón hacia la Laguna del Limón.

- Fisuradas, sede de acuíferos locales y discontinuos, de permeabilidad medio-baja. Hemos clasificado en este grupo a la casi totalidad de las formaciones ígneas que predominan en el esqueleto de los relieves de la Cordillera. Así como se ha observado en el campo, las diferentes facies volcánicas, desde las piroclásticas hasta aquéllas más propiamente intrusivas, muestran una densidad generalmente variable de las estructuras de discontinuidad que, en función del litotipo de referencia, están constituidas por juntas de depósito, brechas dinámicas, fracturas de contracción por enfriamiento, planos de esquistosidad, además que por una fracturación de origen tectónico que resulta más intensa en las zonas con tectonización más alta.
El conjunto de estos elementos estructurales organizados en una red continua, anisótropa por los litotipos de origen piroclástico, otorga a estos terrenos, más allá de una obvia variabilidad que podría tener localmente una cierta importancia, una permeabilidad generalmente media. Prescindiendo de situaciones estructurales particulares, el contexto morfológico, en la montaña y a los pies de la misma, de pertinencia de estas litologías hace que se considere que los acuíferos presentes constituyan cuerpos acuíferos de dimensiones generalmente contenidas.

Como ya se ha dicho anteriormente, los terrenos que conciernen al sistema arrecifal de la Planicie Costera Oriental, por su particularidad, han sido tenidos separados respecto de los grupos anteriores y subdivididos en tres clases distintas.

Antes de detallarlas, empero, resulta indispensable puntualizar que, con excepción parcial de la clase vinculada a las calizas arrecifales propiamente dichas, los límites que generalmente separan a las otras dos clases deben considerarse ampliamente indicativos por causa de la dificultad de colocar de manera inequívocable el límite de las dos litofacies de referencia. Dicha dificultad nace tanto por el ya mencionado límite a la observación directa de las secuencias como por motivos sedimentarios, siendo el producto de la zonación heterópica de facies de depósito ambas remontables a la misma cuenca retroarrecifal.

- Formaciones calcáreas bioconstruidas, sede de acuíferos extensos y productivos, de permeabilidad de medio-alta a elevada.
La presencia de estos acuíferos caracteriza a toda la franja costera de Santo Domingo a Bavaro, ampliándose extensamente tanto en correspondencia de la península de la Granchorra como de la expansión oriental de la llanura costera, entre Boca de Yuma y el río Anamuya.
Los terrenos acuíferos de esta franja están caracterizados por una elevada permeabilidad primaria por cavidades y microcavidades sindeposicionales a las que se asocia una permeabilidad por fracturación generalmente subordinada.
Las potencialidades acuíferas, testimoniadas por las numerosas obras de toma, públicas y privadas, efectuadas en correspondencia de los terrenos que entran, aumentan sensiblemente en las zonas en las cuales se sobreponen los efectos tanto de una fracturación más intensa que de la disolución de los carbonatos; estos factores resultan asociados a menudo, como se ha verificado en el extenso sector comprendido entre el río Chavón y Pantanal donde a la fenomenología kárstica se asocian los efectos de la neotectónica.
En esta zona la presencia de desniveles de origen tectónico determinan a veces la accesibilidad superficial a las aguas del sistema kársico, como sucede en Bayahibe y, probablemente en Pantanal.

Además de esta zona, de dimensiones decididamente impresionantes, están presentes también otros sectores que muestran claros signos de la presencia de un desarrollo consistente del fenómeno de karsificación de las calizas. Por la amplitud del fenómeno vale la pena mencionar a todo el sector costero al O de Santo Domingo hasta la altura de Juan Dolio, donde desaparece cualquier forma de drenaje superficial.

Como notación final, no se puede no recordar que, para acuíferos en sistemas kársticos como el de las zonas mencionadas, la elevada transmisividad asociada a la escasa capacidad de autopurificación hacen que estos acuíferos sean particularmente vulnerables a las contaminaciones procedentes de la superficie.

- Sucesión calcáreo-detrítica sede de acuíferos extensos, generalmente productivos, con permeabilidad generalmente de media a medio-alta.

Esta clase está extensamente representada en toda la franja interna de la Planicie Costera, por amplitudes generalmente superiores a la decena de kilómetros.

En la variabilidad que los caracteriza, los acuíferos que pertenecen a esta clase están constituidos por una sucesión predominantemente calcárea en la que están representados niveles detríticos de distintas facies granulométricas que varían desde las brechas calcáreas hasta los lodos calcáreos. De las observaciones que se logran efectuar en las secciones presentes tanto en la parte central como en la oriental de la Planicie Costera, la litofacies predominante es tendencialmente gruesa con presencia de matriz fina, siempre de naturaleza carbonática.

El sedimento muestra un grado de cementación predominantemente medio-bajo aunque no son infrecuentes endurecimientos mayores especialmente en el sector oriental. Tal contexto de litificación se traduce en la conservación para las facies de granulometría mayor de una buena porosidad primaria, que puede observarse también en macroescala, a la cual se sobrepone una fracturación que por intensidad, salvo de todos modos contextos particulares de tectonización más fuerte (recordamos todo el sector al S-SE de Higüey) parece incidir marginalmente sobre la permeabilidad general de los acuíferos.

El incremento presumible de los niveles más finos (mudstone, calcilutitas) progresando hacia las partes internas de la paleocuenca de depósito hace que sea posible formular la hipótesis de que, procediendo hacia arriba se produzca un tendencial decaimiento de las cualidades del acuífero, con posible instauración de locales situaciones de semi-artesianidad.

Como ya se ha mencionado en los capítulos anteriores, en algunos sectores de pertinencia de esta clase están presentes formas pseudokársticas sub-superficiales cuya real naturaleza no ha sido posible definir a través de las verificaciones de campo; resulta obvio que el vínculo de estas formas con el desarrollo de fenomenologías kársticas en correspondencia de tales áreas, a verificar con investigaciones más profundizadas, se reflejaría en un teórico incremento local de las potencialidades del acuífero.

Por la extensión del fenómeno no puede despreciarse, al O del río Higuamo, la presencia en superficie de una cobertura de terreno residual que, habiéndose formado por causa de una intensa acción de weathering, cubre casi con continuidad, por espesores no bien definidos, la mayor parte de este sector.

- Sucesión terrígena con intercalaciones calcáreo-detríticas de frecuencia variable, sede de acuíferos de permeabilidad generalmente de media a medio-baja.

Esta clase corresponde a la parte de los depósitos cuaternarios indiferenciados que afloran al N de Santo Domingo, presente por detrás de los terrenos carbonáticos cuaternarios.

Como ya se ha mencionado en la introducción a la descripción de las clases

hidrogeológicas, la escasa accesibilidad a la observación de la sucesión y la degradación tendencial en los depósitos calcáreos hacia el SE y en los depósitos francamente terrígenos hacia el NO hacen que los límites de esta clase sean más bien indefinidos y por lo tanto aceptables a un nivel puramente indicativo.

En sentido general, las estratigrafías disponibles y los pocos afloramientos superficiales muestran facies de los sedimentos generalmente medio-finos tanto en los niveles terrígenos como en los calcáreo-detriticos. Esto se traduce en una permeabilidad general del acuífero más bien reducida pero, en función de la variabilidad presumible para sucesiones sedimentarias de esta tipología, es posible que se verifiquen localmente condiciones de mayor productividad del acuífero. Análogamente, siempre en escala local, el desarrollo de litofacies de granulometría fina pueden favorecer fenómenos de artesianidad y condiciones de multiacuífero.

El último grupo es lo relativo a:

- Formaciones de baja permeabilidad y sin acuíferos significativos, está constituido por un amplio espectro de litotipos que van desde los sedimentos margosos presentes en el sector de Nizao en el lado occidental del área (para un mayor detalle ver el capítulo relativo al área de Baní), hasta las formaciones esquistosas aflorantes en los relieves al O del pueblito de Sierra Prieta, a lo largo de la carretera que lleva a La Estancia, comprendiendo también los depósitos palustres litorales presentes en el S de la península de la Granchorra y los de las lagunas de Bavaro, Mala Punta, El Quemado y de la Bahía de Maimón.

A esta misma tipología hidrogeológica han sido asignadas algunas zonas al N del río Anamuya que, aunque caen en el área de afloramiento de las calizas arrecifales s.l., presentan condiciones persistentes de empantanamiento que podrían ser indicativas o de una permeabilidad superficial muy baja, con consiguientes estancamientos superficiales favorecidos por la conformación casi llana, o de fenómenos de emergencia de la capa hídrica, no verificables, empero, por falta de datos suficientes para reconstruir la geometría y las cotas del área de pertinencia.

La determinación a través de los ensayos de bombeo de algunos parámetros hidrogeológica (tab.6.6.2/1) de las principales formaciones acuíferas carbonáticas ha evidenciado valores de transmisividad (T) calculados variables. Hay que notar que el valor máximo de T ha sido calculado en el pozo de S. Pedro, ($2.92 \times 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$), y representa probablemente una situación típica de las calizas arrecifales; en promedio se encuentran valores mucho más bajos, con ordenes de magnitud comprendidos entre $10^{-2} \div 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$.

Valores muy altos se encuentran a lo largo de todo el sector costero, en correspondencia de las calizas arrecifales, confirmando el orden de magnitud de los datos bibliográficos disponibles ($> 10000 \text{ m}^2/\text{dia}$).

Todo el sector de retro-arrecife, hacia el norte, está caracterizado por depósitos sedimentarios tal vez con intercalaciones finas importantes, así que los valores de T disminuyen sensiblemente.

Al límite NO del área de estudio, el sector de Monte Plata, donde se vuelve preponderante el componente terrígeno, con sus espesores reducidos y su predominancia de depósitos finos, se caracteriza por las T más bajas.

Se puede por lo tanto concluir que se encuentran en promedio variaciones de 2 – 3 órdenes de magnitud desde las calizas arrecifales y los antedichos depósitos finos de Monte Plata.

Los coeficientes de almacenamiento calculados por todos los ensayos de bombeo parecen valores típicos de acuíferos cautivos o semicautivos, algo lógico y justificado en relación a la

presencia de intercalaciones finas limosas y arcillosas que se encuentran en la casi totalidad de las estratigrafías.

De todas formas estos valores de almacenamiento van tomados con mucho cuidado por ser muy escasos y variables, a pesar de la extensión del área de estudio.

7.1.2 Pozos, sondeos y manantiales

El número de pozos en la Planicie Costera Oriental es con mucho el más elevado respecto de todas las áreas de estudio, tanto por la existencia de grandes instalaciones urbanas (San Cristóbal, Santo Domingo, San Pedro de Macorís, La Romana, Salvaleón de Higüey) y hotelero-turísticas (Boca Chica-Juan Dolio, San Pedro de Macoris, La Romana, Punta Cana, Bavaro). Al contrario los pozos para uso agrícola, aunque estén difundidos, son generalmente de importancia reducida, en términos de caudales extraídos, en consideración de la predominancia de cultivos secos (Caña de azúcar). En general se trata de pozos, aun relativamente profundos, a menudo en condiciones semiconfinadas. En efecto son intercalaciones finas, tanto en el interior de las calizas arrecifales que se encuentran sobre todo en las áreas retroarrecifales donde pueden ser predominantes.

No se han individualizado manantiales de relieve en el área de estudio, con la excepción del manantial La Toma, en el sector de San Cristóbal (datos INAPA).

Se nota sin embargo inmediatamente al interior de Bayahibe, en correspondencia de la planicie rebajada delimitada al norte por el escarpe de la terraza mariana y al sur por un análogo escarpe, pero esta vez de origen tectónico, la presencia de manantiales, uno de los cuales muestreado en el curso de la investigación sobre las aguas minero-medicinales (véase Anexo 9 muestreo 1571). La tipología es la típica de los manantiales de emergencia de la napa en correspondencia de bajos topográficos relativos. En este caso la superficialidad de la napa está comprobada también por las numerosas cuencas de corrosión kárstica con presencia de agua en el fondo. Por análogas interacciones entre morfología topográfica y piezometría no debe excluirse que, aunque no se las haya observado, puedan existir análogas emergencias, aunque sea ocasionales, al E de la Bahía de Yuma, entre Cabo San Rafael y la laguna de Hoyo Claro.

7.1.3 Piezometría

Piezometría y variaciones piezométricas en el tiempo

La piezometría observada y utilizada para la calibración de los modelos matemáticos es visible en el Mapa 11/1/1 y en el Mapa 11/1/2 (ver Entrega final – Mapas – Mapas Piezométricos) y/o en el Mapa 9/1 (ver Entrega Final – Mapas – Mapas Hidrogeológicos)

Los datos piezométricos disponibles son numerosos y generalmente distribuidos de modo homogéneo en el área de estudio, de extensión de aproximadamente 200 Km x 40 km. La densidad de dichos datos es tal que permite de todos modos una reconstrucción satisfactoria del comportamiento piezométrico regional.

El sector más importante por extensión de su área y por centros poblados, industriales y turísticos, y con características homogéneas bajo el perfil piezométrico, es el que se extiende desde los afloramientos de rocas vulcano-sedimentarias de la Cordillera Central (al N y NO de la ciudad de Santo Domingo) hasta el sector comprendido entre La Romana y Salvaleón de Higüey. El comportamiento piezométrico está caracterizado en general por una dirección de flujo permanente de N a S, desde los afloramientos de la Cordillera Central hacia el Mar Caribe, con excepción de la parte más occidental, inmediatamente al N de la ciudad de Santo Domingo, donde las direcciones de flujo están controladas de forma muy evidente por la topografía y por el comportamiento drenante de parte de la red

hídrica superficial. En dicha área, los flujos son generalmente del O hacia el E, en el sector derecho de la cuenca del Río Ozama.

Un análisis más detallado permite individualizar algunos puntos de interés más particulares que justifican un análisis por sub-áreas.

– **Sector de Santo Domingo-Monte Plata.**

Inmediatamente ubicado al N de la ciudad de Santo Domingo, se halla el sector que más se distingue de los otros, por efecto del papel drenante llevado a cabo por los ríos Ozama y La Savita. Las cotas piezométricas básicas están condicionadas por los cursos de agua en cuestión y se colocan alrededor de los 10 m s.n.m. : de forma análoga las isopiezas y las direcciones de flujo se distribuyen en relación con la posición del eje del drenaje.

– **Sector de Santo Domingo-San Pedro de Macorís.**

Las isopiezas se alejan mucho de la línea de costa y aumentan su densidad cerca de los afloramientos de la Cordillera Oriental o, de todos modos, no lejos de los mismos. ¡Obsérvese a tal fin cómo la isopieza 10 m se encuentra a aproximadamente 20-25 km de la línea de costa y la isopieza 5 m aún a aproximadamente a 15 Km! Se trata de una configuración que puede ser debida, según nuestra opinión, a un efecto combinado de las influencias de los ríos en los límites (el Río Ozama y el Río La Savita al O y el Río Higuamo en San Pedro de Macorís al E) y sobre todo a la magnitud de los aprovechamientos de las aguas subterráneas, que al NE del área urbana de Santo Domingo, en presencia de pozos de alimentación del acueducto, alcanzan valores críticos también en relación con los fenómenos de intrusión de la cuña salina. Otro elemento a ser evaluado en relación con la sensible reducción de los gradientes piezométricos, podría ser un gradual aumento de los valores de transmisividad a medida que se aproximan los litotipos bioconstruidos del área costera. Observando la marcha de la isopieza cero, es evidente el generalizado y apreciable aprovechamiento de recursos hídricos subterráneos próximo al área costera, con tomas localizadas esencialmente en las localidades turísticas de Boca Chica, Guayacanes y Juan Dolio. Fenómenos generalizados de salinización se conocen bien en este sector costero, como efecto de la intrusión de la cuña salina inducida por cargas piezométricas muy reducidas.

– **Sector de San Pedro-La Romana.**

El sector en cuestión ve una gradual y marcada migración de las isopiezas desde el N hacia el S, desde la extremidad occidental, a partir del río Higuamo hasta La Romana. En esta última, la isopieza 10 m se encuentra justo al Norte de la ciudad, a no más de 4-5 km de la línea de costa. Se trata de un efecto que se puede explicar con un incremento generalizado de las cotas topográficas y, a gran escala, por la proximidad de los afloramientos de la Cordillera Oriental a la costa. Los gradientes piezométricos, generalmente muy bajos en el área anterior, aumentan rápidamente. En la proximidad del límite oriental de la población de La Romana, el Río Chavón, muy encajonado, actúa como base de drenaje condicionando el comportamiento piezométrico local y regional.

– **Sector de La Romana-Salvaleón de Higüey-Punta Cana**

Sector muy extenso y que comprende a la península de La Granchorra (en la cual faltan totalmente las informaciones por ausencia de centros poblados y por consecuencia de perforaciones), está caracterizado por una gradual migración de la dirección del flujo

subterráneo de N-S a NO-SE, para pasar luego al sector del que se habla más adelante (Bávaro-Bahía Maimón). Inmediatamente aguas abajo de la población de Salvaleón de Higüey, en la extensa llanura cuaternaria, se evidencia una zona de recarga generalizada al sistema subterráneo, con una marcada migración de las isopiezas hacia el S.

– Sector de Bávaro-Bahía Maimón

Este sector representa el límite oriental del área de estudio, asomándose al canal de la Mona, que separa a La Hispaniola de Puerto Rico. La piezometría tiene aquí un comportamiento muy diferente del sector anterior, con direcciones de flujo de OSO a ENE. El área de afloramiento de la Cordillera Oriental se acerca mucho a la costa pero en general las isopiezas se alejan de esta última. Según nuestra opinión, este hecho debe tener relación con los valores muy elevados de transmisividad inducidos también por fenómenos generalizados de karstificación (muy evidentes al S de Punta Macao-Río Anamuya). Las tomas, aún siendo consistentes por el desarrollo turístico-hotelerero del área, no parecen influir de manera significativa sobre el comportamiento de la piezometría.

– Sector al O de la capital (Santo Domingo-Nizao)

Este sector está caracterizado por una mayor diferenciación geológica, con presencia de un Cuaternario extenso en dirección SO-NE a cotas de 40-60 m y separado del mar Caribe por afloramientos de rocas de la secuencia carbonático-terrágena de la formación Ingenio Caei (ver Geología) con cotas máximas sólo un poco más elevadas (80-100 m). Los datos piezométricos disponibles son pocos, las correlaciones no siempre son posibles por presencia de horizontes piezométricos locales. De toda forma, a gran escala, los flujos son de NO a SE y se nota que existe un limitado alejamiento de la isopieza cero con respecto de la línea de costa.

Algunas ambigüedades permanecen, como consecuencia de la extensión del área de estudio y, por lo tanto, de la densidad de los datos disponibles, con referencia a los siguientes problemas:

- Posible existencia de condiciones de multiacuífero. Todo el sector interno de la Planicie Costera Oriental, entendido como el sector inmediatamente detrás de las facies bioconstruidas arrecifales (aflorantes a lo largo de toda la franja costera) y limitado al N por los relieves de la Cordillera Oriental, está caracterizado desde el punto de vista litológico por alternación de facies calcáreo-detríticas y de facies francamente terrígenas, a veces de granulometría fina (ver Geología para mayores detalles). En dicho sector, por sus características litológicas y estratigráficas, se pueden encontrar diferenciaciones parciales del compartimiento subterráneo, por lo menos a escala local. Sin embargo, los datos piezométricos disponibles no son suficientemente numerosos para permitir una definición de detalle a nivel local, y no parecen apoyar la idea de una diferenciación importante en más acuíferos a escala regional. Nótese además cómo la presencia de niveles finos arcillosos, a menudo encontrados también en la superficie en extensiones apreciables (véanse el mapa hidrogeológico de proyecto y los perfiles estratigráficos), puede implicar, a nivel local, la instauración de condiciones de acuífero confinado.
- Relaciones de intercambio con la red hídrica superficial. No siempre las relaciones de intercambio son de evaluación clara, con referencia explícita al comportamiento alimentante o drenante de los cursos de agua. Una evaluación final no puede

prescindir de los resultados de las actividades de estudio en el campo de la hidrología.

Por lo que se refiere al análisis de las variaciones piezométricas en el tiempo, vista la no disponibilidad de datos históricos en forma y cantidad adecuada, se tomaron en cuenta las medidas hechas en el período anterior al ciclón George (Septiembre de 1997 – Septiembre de 1998).

En la figura 3.1/1 se visualiza la distribución de los valores piezométricos máximos y mínimos a lo largo del año hidrológico.

Los mínimos se observan esencialmente alrededor del mes de Mayo (entre Marzo y Agosto).

Los máximos por otro lado tienen mayor frecuencia en Septiembre y se sitúan esencialmente entre este mes y Diciembre.

Las variaciones anuales son generalmente muy reducidas (en su mayoría inferiores a 1 m): las máximas observadas no superan los 3 metros y son porcentualmente insignificantes.

Más en detalle, desde el punto de vista de las variaciones piezométricas anuales se puede subdividir la Planicie en tres zonas principales:

– Zona al Oeste de Santo Domingo y del Canal Yabacao.

La mayoría de los pozos observados han permitido calcular variaciones inferiores a los 50 cm y nunca superiores a 1m. Hacen excepción:

Un área al borde Norte de la zona estudiada al Norte de La Romana y de Salvaleón de Higüey, donde existen algunos pozos con variaciones de nivel hasta los 2.5 m;

Un área al Nor-Oeste del Río Maimón donde todos los pozos medidos han dado variaciones entre 1 y 2 metros.

En todos estos pozos y en los otros existentes en las mismas áreas se encuentran bombas en funcionamiento, lo que podría contribuir a aumentar el orden de magnitud de las variaciones.

– Zona de las cuencas del Río Ozama y del Río Haina

Se observan variaciones más comunes entre 1 y 2 metros: variaciones inferiores al metro se concentran en el área al Oeste y Sur-Oeste de Santo Domingo.

– Zona de caliza entre el Río Nigua y el Río Nizao

Las variaciones observadas se sitúan entre 1.5 y 3 m: son las máximas encontradas en la Planicie Costera Oriental.

Por lo que atañe a las variaciones de los niveles medios después de 1970, con los pocos datos históricos en nuestro poder se puede observar que:

– Los niveles generalmente han bajado con los años en las zonas de S. Pedro de Macorís y de Boca del Soco (variaciones que pueden alcanzar valores superiores a los 2 metros), de los Llanos, de Guerra y de San Cristóbal (variaciones mucho más reducidas con valores superiores a los 25 cm), de Guaymate y de Salvaleón de Higüey (variaciones superiores a 1 m).

– Los niveles generalmente han subido en la zona entre San Rafael del Yuma y Boca de Yuma con variaciones a veces superiores a 1 metro.

– Los valores se han quedado más o menos iguales en la zona al norte de Santo Domingo.

Para tener indicaciones sobre los efectos de las lluvias del último año donde hay que tomar en cuenta los eventos relacionados con el huracán George, se analizaron los valores medios de los niveles piezométricos en Junio, Julio y Agosto de 1998 (antes del ciclón) y los del período Junio, Julio y Agosto de 1999. Los resultados se pueden resumir

así:

Se ha observado un aumento de las cotas piezométricas con una variación media de 27 cm. Las cotas subieron en el 74.14% de los puntos con una variación en gran parte inferior a los 50 cm (en el 49.4% de los puntos)

Proposición de una red de control piezométrico

En esta área los puntos aptos para la ejecución de medidas piezométricas, indicados en el Mapa 2/1/1 y en el Mapa 2/1/2, son en total 239. De estos, el 36.4% (87 puntos) no tienen bombas instaladas: el restante 63.6% (152 puntos) están equipados con bomba.

La red de control escogida cuenta con 68 puntos, de los cuales 20 (29%) están dedicados solamente a la red y 48 (71%) privados. Los puntos de la red sin bomba son 20 (29%) y con bomba instalada son 48 (71%).

La repartición en el espacio de los puntos propuestos está de acuerdo con los criterios generales indicados en el párrafo 6.3.1. Se incluyeron todos los puntos de intrusión marina y los de control de campos de pozos: la densidad de puntos es más elevada en las áreas críticas como el área entre el río Cumayasa y el Distrito Nacional.

7.1.4 Calidad de las aguas subterráneas - caracterización hidroquímica

El objetivo de la hidroquímica es suministrar un cuadro de las tipologías de las aguas subterráneas presentes en una región y verificar su estabilidad en el tiempo.

El programa de muestreo llevado a cabo en el arco del proyecto, articulado en cuatro campañas repetidas en los límites de lo posible en los mismos puntos, permite efectuar para cada área y en cada uno de los puntos un doble análisis, en función del tiempo y en función de la distribución areal.

Para un análisis rápido y funcional, los resultados analíticos de las cuatro campañas se transpusieron en el diagrama de Stiff (ver Anexos Memorias - Anexo 6), representando en cada ficha todos los análisis repetidos en el tiempo en el mismo punto de la red. En cada diagrama, para indicar la campaña de muestreo relativa a la representación gráfica de la muestra, al número de inventario del pozo se le agregó "/1, /2, /3, /4", por ejemplo, la muestra 1001/1 se refiere a la primera campaña.

Este tipo de diagrama permite representar, con una poligonal cerrada, la tipología química de la muestra de agua y, contemporáneamente, tener el valor de la concentración de cada uno de los seis iones mayores, expresada en meq/l.

La clasificación hidroquímica propuesta fue redactada sobre la base del diagrama de Piper.

Desdichadamente, las informaciones litoestratigráficas no son suficientes para la codificación de una clasificación tan articulada, por lo tanto a nivel de interpretación se consideraron las familias principales sin ahondar en sus subdivisiones.

Para la redacción del "Mapa de la caracterización hidroquímica de las aguas subterráneas" (Mapa 4), se tuvo en cuenta la composición predominante de cada uno de los puntos en el arco de las cuatro campañas efectuadas.

Para obviar al inevitable agolpamiento en las representaciones gráficas de Piper, para el área "Planicie Costera Oriental" se adoptó una ulterior subdivisión en cuatro sub-áreas.

Esta subdivisión se hizo teniendo en cuenta las indicaciones emergidas de las investigaciones hidrogeológicas e hidrográficas; son una excepción los límites Oeste y Este; éstos están constituidos por el límite administrativo con Baní y por la línea de costa. El código de identificación de los sectores desde el Oeste hacia el Este está dado por las letras: a, b, c, d (Fig. 7.1.4/1)

“a” sector al Oeste del Río Ozama;

“b” sector comprendido entre el Río Ozama y el Río Higuamo;

“c” sector comprendido entre el Río Higuamo y el Río Duey-Yuma;

“d” sector al Este del Río Duey-Yuma.

En total, en las cuatro campañas efectuadas se tomaron 823 muestras de agua subdivididas de la siguiente manera:

127 en el sector “a”;

298 en el sector “b”;

230 en el sector “c”;

168 en el sector “d”.

Sector “a”

El sector más occidental de la PCO comprende la ciudad de S. Domingo, cuya área metropolitana no ha sido considerada en el presente estudio.

La composición química de las aguas resulta ser en general bastante estable. Los tipos hidroquímicos resultan ser los siguientes (Fig. 7.1.4/2-a,-b,-c,-d):

aguas bicarbonato-alcalino-térreas;

aguas bicarbonato-alcalinas;

aguas clorurado-alcalinas.

Las aguas bicarbonato-alcalino-térreas, representativas de la circulación hídrica regional, son el tipo hidroquímico predominante, éstas resultan caracterizadas por salinidades no muy altas, en general comprendidas dentro de los 0,5 g/l como prueba de su proximidad a las áreas de recarga. Localmente el componente alcalino-térreo puede distinguirse en cálcico y magnésico, como prueba de realidades litológicas locales.

Como prueba de una realidad litoestratigráfica particular, en el sector centro-septentrional están presentes aguas de tipo bicarbonato-alcalino. La salinidad de estas aguas resulta en general baja, y de todas maneras, no excede los 0,5 g/l.

Pocos puntos resultan caracterizados por una composición clorurado-alcalina, este tipo hidroquímico aparece esencialmente en el sector costero de S. Gregorio de Nigra, probando la presencia de interacción de las napas con el agua del mar. La salinidad en este caso llega a valores de aproximadamente 1 g/l.

Sector “b”

La composición química de las aguas resulta ser en general bastante estable. Las familias hidroquímicas predominantes resultan ser las siguientes (Fig. 7.1.4/3-a,-b,-c,-d):

aguas bicarbonato-alcalino-térreas;

aguas bicarbonato-alcalinas;

aguas clorurado-alcálinas.

En el ámbıto de estas familias principales están presentes algunos sub-grupos, previstos por la leyenda, cuya importancia para los fines de la clasificacın resulta ser marginal.

La situacın resulta estar caracterizada por la presencia de dos polos constituidos por las aguas bicarbonato-alcálinas-térreas y por las clorurado-alcálinas vinculados entre sí por una constelacın de muestras de composicın intermedia. De esta situacın se alejan algunas muestras, siempre de composicın alcáalina, pero con predominancia del componente bicarbonatado o sulfatado. Geográficamente los dos grupos principales tienen una colocacın bien precisa longitudinalmente a la línea de costa; las aguas bicarbonato-alcálinas-térreas, de salinidad medio-baja (<1 g/l), que representan la recarga regional, ocupan la mayor parte del área, mientras que las clorurado-alcálinas, de salinidad medio-alta (1÷3 g/l) en general no se encuentran a más de 4÷5 km de la línea de costa, sólo a lo largo de los cursos de agua mayores éstas llegan a afectar a las zonas más internas. En algunos casos este tipo hidroquímico se presenta en sectores internos vinculados con la red hidrográfica superficial.

Los dos componentes hidroquímicos menores resultan estar desperdigados como prueba de situaciones extremadamente localizadas.

Sector “c”

La composicın química de las aguas resulta ser en general bastante estable. Las familias hidroquímicas predominantes resultan ser las siguientes (Fig. 7.1.4/3-a,-b,-c,-d):

aguas bicarbonato-alcálinas-térreas;
aguas bicarbonato-alcálinas;
aguas clorurado-alcálinas.

La distribucın de los tipos hidroquímicos en este sector resulta estar generalmente bien definida.

Las aguas bicarbonato-alcálinas-térreas están presentes en las dos extremidades.

Las aguas bicarbonato-alcálinas ocupan el sector central.

Las aguas clorurado-alcálinas en general se distribuyen a lo largo de toda la franja costera, sin embargo éstas están presentes también en el sector noroccidental.

En el sector centro-occidental, la situacın litoestratigráfica parecería estar caracterizada por la presencia de depósitos de tipo lagunar, cuya lixiviacın puede alterar la característica composicın bicarbonato-alcálinas-térrea de la recarga regional. Estas aguas, en efecto, presentan salinidades medio-altas, cuyo crecimiento de todas maneras, no puede relacionarse con la escorrentía.

Sector “d”

La composicın química de las aguas resulta ser en general bastante estable. La tipología hidroquímica resulta estar compuesta de la siguiente manera (Fig. 7.1.5/4-a,-b,-c,-d):

aguas bicarbonato-alcalino-térreas;
aguas clorurado-alcalinas.

En este sector, si se excluyen algunas situaciones locales, las aguas bicarbonato-alcalino-térreas están presentes en la parte interna, mientras que las clorurado-alcalinas caracterizan a la costa.

Esta distribución pone en evidencia el papel jugado por la intrusión marina, favorecida también por el retículo hidrográfico superficial.

De la investigación específica sobre la calidad potable de las aguas subterráneas emerge cómo (véase Anexo 8) toda la planicie oriental está caracterizada por el intenso aprovechamiento, no sólo para fines potables, de las capas acuíferas. Todos los principales centros poblados emplean, por entero o parcialmente, recursos hídricos subterráneos para su abastecimiento. Lo mismo vale para los centros menores y para los numerosos bateyes presentes en el interior de los extensos cultivos de caña de azúcar.

El dato principal, y más llamativo, de todo el sector de investigación es el marcado decaimiento de las aguas subterráneas a lo largo de toda la franja costera por fenómenos de salinización ligados a la intrusión de agua marina. Dicha franja de comprometimiento resulta ser particularmente extensa en las áreas de mayor urbanización (Santo Domingo, San Pedro de Macoris, La Romana), cómplice también el aprovechamiento excesivo de los acuíferos locales.

Es marcadamente llamativa la extensión del fenómeno de cloruración de las aguas por más de una decena de kilómetros a las espaldas de San Pedro de Macoris, en dirección de Los Llanos.

El decaimiento cualitativo por presencia de cloruros se registra también en las zonas del interior pero de manera circunscrita y sin un vínculo aparente con aguas de origen marino. La impresión es que en dichos casos el papel principal deba atribuirse a la presencia, hipotetizable, de niveles ricos de sales solubles plausiblemente formados por la instauración de condiciones evaporíticas en las lagunas interiores del sistema arrecifal.

La observación de la distribución de la potabilidad en las zonas interiores muestra un cuadro cualitativo mejor en el segmento entre Santo Domingo y San Pedro de Macoris respecto de todo el sector oriental donde son más frecuentes las indicaciones de prohibiciones temporáneas de potabilidad de las aguas subterráneas, principalmente causadas por ascensos no tolerables del contenido salino.

Al norte de la capital la potabilidad resulta mayormente garantizada limitando, y no continuamente, los parámetros fuera de norma a los nitritos/nitratos en los pozos presentes al oeste de Monte Plata, y a valores reducidos del pH en algunos pozos al sur de la misma población.

Siempre en dicho ámbito areal, los pozos muestreados específicamente para la investigación de potabilidad (1562, 1563) resultan no potables, debido a valores no aceptables del contenido de sulfatos.

En la zona de San Cristóbal el cuadro de la potabilidad se muestra más bien articulado, sin una precisa definición de áreas cualitativamente distinguidas; también en dicho sector se puede hipotetizar una influencia, aunque sea leve, de las aguas marinas en algunos puntos hídricos ubicados inmediatamente a las espaldas de la costa, mientras que el dato cualitativo en correspondencia de la población de San Cristóbal muestra localmente un parcial decaimiento o por altos contenidos de la carga mineral, o por el magnesio, o por

los sulfatos.

La estructura geológica de la Planicie, constituida por una parte frontal de elevada permeabilidad, tanto por motivos de depósito (facies carbonáticas “arrecifales” con alta porosidad primaria residual) como por sobreposición de vastos e intensos fenómenos de carsificación, es tal que vehicula con facilidad las posibles contaminaciones haciendo que tales acuíferos se vuelvan carbonáticos, tanto en los tiempos como en las áreas, particularmente vulnerables a cualquier posible acción que pueda provocar el decaimiento de las calidades potables.

Para las 2 aguas de carácter minero-medicinal muestreadas en el ámbito del proyecto, la composición química determinada ha permitido individualizar las peculiares características terapéuticas, expuestas en detalle en el Anexo No. 9 y obtener las siguientes informaciones:

- la presencia de H_2S , que caracteriza de manera más o menos marcada, a las mezclas de agua producidas por los manantiales, indica aportes de circuitos vinculados con sistemas reductores, típicos de acuíferos profundos, y elevados tiempos de permanencia en los mismos; esta hipótesis está valorada por la presencia de los elementos menores Yodo y Bromo en concentraciones superiores a la norma;
- la discreta mineralización y los análogos cocientes sodio/cationes predominantes y cloruros/aniones predominantes, indicando un probable origen profundo y sucesivas diluciones con aguas meteóricas más ricas de Calcio y Bicarbonatos.

Ulteriores indicaciones de probable circulación profunda de las agua muestreadas, son las temperaturas de emergencia bastante elevadas; resultan de todas maneras siempre inferiores a la local temperatura del aire, en promedio consistente en el período de la toma.

La confirmación de tales indicaciones podrá de todas maneras derivar de sucesivas investigaciones isotópicas.

En relación con la clasificación de las aguas minero-medicinales (véase Anexo No. 9), las dos aguas pueden definirse como se sintetiza a continuación.

- Manantial n° 1571 (Bayahibe - La Romana):
Puede clasificarse como “Agua mineral hipotermal bicarbonato alcalino térrea” (temperatura 26,1°C; residuo fijo 608 mg/l); los elementos predominantes resultan ser: Bicarbonatos, Calcio, Magnesio; buena es la presencia de: Potasio, Yodo, Silicio, Flúor.
- Manantial n°1572 - Los Tres Ojos (S.to Domingo):
Puede clasificarse como “agua mineral bicarbonato-salado-sulfato-yódico-alcalino-térrea hipotermal” (temperatura 26,8°C; residuo fijo 1058 mg/l); los elementos predominantes resultan ser: Bicarbonatos, Cloruro, Sodio, Sulfato, Yodo, Calcio, Magnesio; buena es la presencia de: Potasio y de Silicio.
Resulta ser pues un agua con rica presencia de elementos de utilidad terapéutica y en particular con propiedades sedantes, antiespásticas y antialérgicas.

Obtenida la condición indispensable de la pureza bacteriológica, la dos aguas presentan las siguientes posibilidades de indicación:

- Hidropinoterapia ;
- Crenoterapia externa;
- Crenoterapia inhalatoria.

7.1.5 Salinidad e intrusión marina

Para obviar a la escasez de puntos idóneos para la ejecución de los perfiles verticales de salinidad, en las zonas costeras de proyecto el análisis a los fines de la individualización del fenómeno de la intrusión marina se extendió a todos los puntos de la red de control de la calidad. Para alcanzar el objetivo se llevó a cabo un análisis del contenido de cloruros relevado en todas las muestras analizadas, seleccionando punto por punto aquella con el tenor más elevado. La clasificación presentada en el Mapa de la intrusión marina (Mapa 5) fue elaborada sobre la base de una escala subdividida en cuatro clases:

$Cl \leq 100 \text{ mg/l};$
 $100 \text{ mg/l} < Cl < 250 \text{ mg/l};$
 $250 \text{ mg/l} < Cl < 1000 \text{ mg/l}$
 $Cl \geq 1000 \text{ mg/l}.$

Las clases propuestas se definieron en función de los siguientes objetivos:

- Caracterizar las aguas inalteradas;
- Poner en evidencia la evolución de las aguas, quedando en el interior de los límites de potabilidad válidos en la República Dominicana;
- Poner en evidencia los procesos de comprometimiento en acto;
- Poner en evidencia los comprometimientos irreversibles.

Por último se analizaron los perfiles verticales de salinidad efectuados para la evaluación tridimensional del fenómeno.

Sobre la base de los criterios arriba expuestos, la distribución de los cloruros en esta área (Mapa 5) pone en evidencia el grave fenómeno de salinización de las aguas subterráneas, sintetizado en la figura 7.1.5/1 en la cual se distinguen las áreas con comprometimiento en acto de aquéllas que corren potencialmente el riesgo de comprometimiento. Este fenómeno resulta sorprendente en la franja costera sensu stricto, en general 1 km, sin embargo el fenómeno afecta a una franja de muchos kilómetros de profundidad.

Un caso particular está representado por las áreas que circundan a los mayores centros urbanos y/o agrícolas y turísticos, donde la presencia de aguas salobres es relevante de manera casi continuada también a una distancia de una decena de kilómetros de la costa.

Analizando los 25 perfiles verticales efectuados en esta área se obtiene un cuadro tridimensional del fenómeno.

En el área de San Cristóbal el único perfil vertical pone en evidencia un sensible incremento de la salinidad a partir de una profundidad de 15 m en buen acuerdo con el cuadro puesto en evidencia por el mapa de distribución de los cloruros que indica la presencia de aguas salobres tanto a lo largo de la costa como en el interior.

El área al NE de la ciudad de S. Domingo resulta estar mucho más comprometida, con un incremento de los valores de salinidad de un orden de magnitud, en cotas comprendidas

entre los pocos metros y algunas decenas de metros por debajo del nivel estático. Esta situación está puesta en evidencia también por la presencia de aguas con tenores de cloruros típicos de las aguas salobres.

Entre Boca Chica y San Pedro de Macorís están disponibles nueve perfiles verticales, puestos sobre tres directrices sub-paralelas entre sí y ortogonales a la costa. En el interior del hipotético cuadrilátero con vértices: La Joya, Boca Chica, Boca de Soco, Batey Monte Cristi; está presente una situación decididamente crítica. En general, a una profundidad variable entre los 15 y los 45 m por debajo de la superficie piezométrica se encuentra un salto significativo de la conductividad, salto que en el sector occidental más interno, se coloca en valores inferiores a los 5000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, mientras que en el sector que da a la costa y en aquél oriental aumenta de un orden de magnitud. Donde se dispone de las mediciones repetidas en el tiempo, éstas evidencian fluctuaciones en sentido vertical, a veces consistentes, del flexo indicativo del incremento de la salinidad.

La zona de La Romana resulta estar incluida en el triángulo Guaymate - La Uvita – Bahiaybe formado por los tres perfiles disponibles. También en este caso la zona costera presenta la interfase entre los 10 y los 15 m por debajo de la superficie piezométrica. Los valores de salinidad medidos son decididamente elevados como confirmación de la masiva presencia de cloruros registrada por los análisis efectuados. En el interior la situación no parece estar comprometida, sin embargo las salinidades son de todas maneras apreciables así como los tenores de cloruros.

A lo largo del curso del Río Yuma los tres perfiles disponibles no presentan problemas particulares aun con valores de salinidad elevados, valores que están bien de acuerdo con la presencia difundida de aguas salobres en la zona. Para dar un cuadro completo es necesario recordar que no se poseen datos de la zona al SE de Boca de Yuma, zona en la cual los análisis relevaron la presencia de aguas de alto contenido de cloruros.

Por último la zona de Bavaro entra en el cuadrilátero definido por los seis perfiles distribuidos a lo largo de las directrices: Verón – Bavaro y Cañada Honda – El Macao. La situación resulta estar gravemente comprometida por lo menos hasta los perfiles ubicados más al interior, donde las salinidades registradas entran en los valores normales de las aguas subterráneas “dulces”.

7.1.6 Resultados análisis isotópicos, edad de las aguas y zonas de recarga

La situación que se delinea pone en evidencia una progresiva disminución de los isótopos pesados desde el Oeste hacia el Este (Fig. 7.1.6/1), la única excepción está representada por la muestra 1338 ubicada en la extremidad oriental del sector. La variación podría estar relacionada tanto con la dirección de traslación de las precipitaciones, como con la distinta altimetría de las áreas de recarga, que resultaría ser más elevada en el sector occidental. Ambos fenómenos tienden a generar aguas de precipitación isotópicamente empobrecidas. Los datos en nuestro poder no son suficientes para definir cuál de los dos fenómenos es el que predomina. Sin embargo, esta señal de recarga está parcialmente enmascarada por los dos procesos físicos que afectan a la reserva subterránea:

- mezcla con agua de mar;
- evaporación.

Le evaluación de la cota promedio de recarga basada en la correlación indicada en la

bibliografía [Febrillet H. J., Bueno E., Seiler K. P., Stichler W., 1987. Estudios Isotopicos e hidrogeologicos en la region suroeste de la República Dominicana. Simp. Int. Viena Austria 30 marzo- 3 abril 1987, IAEA-SM-299/031] indica que las muestras pertenece a circuitos recargados en un franja altimétrica comprendida entre los 100 y los 600 metros.

La franja costera resulta ser pues el lugar de los fenómenos de mezcla, entre las aguas dulces y las marinas. Al contrario, las aguas de la franja más interna presentan trazas variamente evidentes de fenómenos de evaporación, que han tenido lugar, probablemente, durante la infiltración.

El contenido de Tritio, si se excluyen dos muestras del sector más oriental (1100, 1338), es muy cercano a cero, e indica una recarga anterior al pico registrado en los primeros años '60. Las muestras: 1100 y 1338, tienen un contenido de Tritio que las coloca en el ámbito de la recarga más reciente, pues con un tiempo medio de residencia inferior al tiempo de reducción a la mitad del isótopo del hidrógeno (~12.5 años).

Los valores de C13 y C14, resultan condicionados por la presencia de materia orgánica en el interior de los acuíferos. La materia orgánica contribuye al contenido total de Carbono de las aguas circulantes en esos acuíferos, dando origen a una alcalinidad cuyo C13 está isotópicamente empobrecido, mientras que el C14 resulta envejecido. Por causa de este doble origen no perfectamente cuantificable existe una notable discrepancia en la edad propuesta por los distintos modelos utilizados. La mayor parte de los modelos de datación aplicados indica una edad actual para

7.1.7 Relaciones ríos-acuíferos

Por lo que atañe al intercambio napa-río, con referencia a las zonas más bajas, caracterizadas por formaciones de caliza organógena de permeabilidad de origen primario y/o secundario (zonas de color morado oscuro y medio en la fig. 7.1.8./1), el examen de las variaciones a lo largo de los ríos del caudal medido en condiciones hidrométricas de agua baja en las secciones de la red de aforo del proyecto (véanse cap. 6.8.1 y 7.2.2 y Anexo Memorias n° 13) y el análisis de las curvas de agotamiento del río Chavón en las estaciones hidrométricas del INDRHI (Anexo Memorias n° 14) revela que:

- en conjunto los ríos Tosa-Ozama, Yabacao-Ozama, Higuamo y Dulce drenan la napa, con un valor promedio (nov.'97-ago.'98) que fluctúa entre los $2 * 10^6$ m³/a (ríos Tosa y Yabacao) y los $12 * 10^6$ m³/a (río Higuamo). Pero el régimen del intercambio de los ríos Yabacao y Higuamo no es constante, es decir hay meses en los cuales prevalece el drenaje mientras que en otros la alimentación, hecho relacionado también con la marcha climática;
- los ríos Brujuela y Cumayasa juegan un papel en la alimentación de las napas subterráneas;
- el río Chavón, con referencia a la sub-cuenca encerrada por las secciones de Santa Lucía, Guanito (Sanate) y Mira Pato, parece jugar un papel de alimentación de la napa (alrededor de los $1.5 * 10^6$ m³/a, análisis de la rama descendente de hidrogramas relacionados con temporadas de lluvia, otoño-invierno '74, relativamente secas en sentido estadístico);
- el río Duey-Yuma, con referencia al trecho aguas arriba de San Rafael del Yuma, en el tramo entre las secciones de aforo en El Mamey (código 240001) y en El Naranjal (código 240002), parece alimentar los sistemas acuíferos con un valor de recarga estimado alrededor de los $3.7 * 10^6$ m³/a (período dic.'97-ago.'98).

7.1.8 Evaluación de la recarga - infiltración eficaz

La zona hidrogeológica de interés, la cual se presenta en la Fig. 7.1.8./1 sacada del Mapa 9/1: Mapa hidrogeológico Planicie Costera Oriental, tiene un área total de 7243.8 km², una precipitación promedio anual de 1370.9 mm y una evapotranspiración potencial de referencia de 1669.4 mm.

Ésta se caracteriza por formaciones contribuyentes a la recarga de tipo poroso (azul), fisurado (verde) y de caliza organógena de permeabilidad de origen primario y/o secundario (morado), las cuales, en conjunto, tienen una superficie de 6542.6 km², esto es el 90% de la superficie total.

En términos generales, la fuente principal de las aguas subterráneas es la recarga pluvial directa; la contribución por recarga lateral e infiltración de escorrentía superficial en los cauces es, en términos relativos, bastante reducida (véase cap. 7.1.7).

En conjunto, teniendo en cuenta las características morfológicas, hidrogeológicas e hidrológicas, han sido individuadas 20 sub-zonas homogéneas (véase cap. 6.8.3, Fig. 7.1.8./1 y Anexo Memorias n° 14).

Para evaluar la tasa de recarga pluvial directa se tomaron en cuenta los parámetros obtenidos del análisis:

- de la marcha climática medida en las estaciones meteorológicas (INDRHI, ONAMET y Central Romana) de San Cristóbal, San Pedro de Macorís, La Romana, Punta Cana, Batey Excavación, Paso del Medio, Lechugas, Baigua, Higuero, Salvaleón de Higuey, Medina, Naranja de China y Anamuya;
- de los hidrogramas medidos en las estaciones de Caobal, río Haina, de Higuero, río Higuero-Ozama, de Don Juan, río Ozama, de Paso del Medio, río Soco, de Santa Lucía y de Mira Pato, río Chavón, de Guanito, río Sanate-Chavón, de El Mamey, río Duey-Yuma, de Anamuya, río Anamuya y de La Guama, río Maimón, en particular para la evaluación de la recarga directa en las sub-zonas 18, 19 y 20 (formaciones fisuradas);
- de los caudales medidos en las secciones de aforo de la red de proyecto (cap. 6.8.1 y 7.2.1) en particular para la evaluación de la recarga directa en la sub-zona 13 (Arroyo Loro, río Ozama).

En la tabla 7.1.8./1, para cada sub-zona, aparecen los valores de la tasa de recarga pluvial directa con referencia al año medio y años secos y húmedos de período de retorno asignado, un año de cada 5 y un año de cada 10.

En conjunto la recarga pluvial directa en la zona hidrogeológica de interés alcanza los siguientes valores:

- | | |
|-----------------------------|----------------------------------------------|
| • años secos (T=10 años): | 920.82 * 10 ⁶ m ³ /a; |
| • años secos (T=5 años): | 1071.32 * 10 ⁶ m ³ /a; |
| • año medio: | 1465.32 * 10 ⁶ m ³ /a; |
| • años húmedos (T=5 años): | 1767.02 * 10 ⁶ m ³ /a; |
| • años húmedos (T=10 años): | 1989.08 * 10 ⁶ m ³ /a. |

7.1.9 Modelos matemáticos de flujo y de intrusión marina

El modelo de flujo, implementado en el ámbito del proyecto, se utilizó para una simulación de previsión a largo término (30 años) frente a una hipótesis de fuerte incremento de las tomas en los sectores de los campos pozos para uso potable de las ciudades de Santo Domingo (incremento del 50%) y de San Pedro de Macorís (incremento del 100%), como así también en todas las áreas turísticas de Boca Chica, Juan Dolio, Guayacanes, La Romana y Bavaro - Punta Cana (incremento del 300%). La hipótesis de incremento se basa, en términos generales, tanto en las estimaciones de crecimiento demográfico como en la idea de una auspiciosa extensión de la red de acueductos existente. Por lo que se refiere en fin a los distritos turísticos, se hizo referencia a las estadísticas sobre las presencias turísticas previstas.

Los resultados son de gran interés e individualizan el área al E de Santo Domingo como la más crítica, en términos de impacto piezométrico en escala regional, con variaciones máximas del orden de diversos metros en correspondencia de los campos pozos (5-8 m) y gran extensión areal de los fenómenos. Siendo la simulación relativa a condiciones transitorias, se puede también observar que estas variaciones se realizarían en tiempos muy rápidos; ya después de 1 año del aumento de las explotaciones, la configuración piezométrica sería muy parecida a aquella calculada al final de la simulación (30 años) por lo menos en proximidad de los campos pozos. Considerando la criticidad de esta área por lo que atañe a los fenómenos de intrusión salina (y sin considerar aquí los fenómenos de “up-coning”, o sea de subida de la interfase salina a nivel local, en relación con explotaciones fuertes y concentradas) y a pesar de que ya las condiciones actuales son bastante críticas, esta hipótesis de incremento de los consumos es inaceptable.

Por lo contrario, los resultados en los otros sectores de estudio indican generalmente variaciones piezométricas muy pequeñas. Generalmente en los sectores costeros la elevada transmisividad, la presencia de líneas preferenciales de flujo subterráneo y la proximidad del mar Caribe limita las variaciones piezométricas de tipo regional. Sin embargo hablamos de sectores siempre muy críticos por lo que se refiere a los fenómenos de intrusión salina (también a nivel local por los mencionados fenómenos de “up-coning”).

Consideraciones adicionales se requieren para el sector de San Pedro de Macorís. A pesar de variaciones piezométricas aun pequeñas (hasta máximos de 1 m), sin embargo el área se presenta como extremadamente crítica. Las piezometrías actuales son muy bajas, en relación sea con las elevadas transmisividades que con el papel que juegan los ríos Soco e Higuamo, cuyas cotas son muy bajas aún a muchos kilómetros al interior. Lo fenómenos de intrusión salina ya estan afectando a los campos pozos de abastecimiento al acueducto de la ciudad y dichas variaciones piezométricas resultan críticas en relación con las cotas actuales ya muy próximas al nivel del mar.

La sección ubicada al oeste de San Pedro de Macoris, está caracterizada por extracciones limitadas y por una piezometría muy deprimida, con valores inferiores a 1 m s.n.m. hasta distancias de más de 20 km de la costa. La simulación del estado natural llevada pone de manifiesto que la intrusión salina afectaba probablemente a cotas superiores a -40 m s.n.m. hasta distancias de 20 km antes de que se operasen consistentes extracciones del acuífero. Se trata pues de una zona en la cual es posible extraer agua con características aptas para una utilización hidropotable sólo de cotas muy reducidas, con caudales limitados y a distancias consistentes de la costa. Se puede pues concluir que en dicha zona no es aconsejable programar incrementos futuros de las extracciones. La isopieza 1 m s.n.m. delinea en esta zona un área ya afectada por fenómenos de intrusión marina.

La sección ubicada al este de Santo Domingo, está caracterizada por extracciones elevadas en correspondencia de los campos pozos localizados al Noreste de la capital, y por una piezometría que conserva medianamente, no obstante las elevadas extracciones, valores superiores a 5 m s.n.m. hasta distancias de aproximadamente 20 km de la costa. La simulación del estado natural llevada a cabo pone en evidencia que la intrusión marina afectaba probablemente a cotas inferiores a -50 m s.n.m. a distancias del mar superiores a aproximadamente 14 km, antes de que comenzasen consistentes extracciones del acuífero.

La simulación de las extracciones en correspondencia de los campos pozos sugiere en las condiciones actuales el riesgo de atracción de aguas salobres por efecto de 'upconing' hacia los pozos de extracción.

Las simulaciones sugieren que un incremento del 50% de las extracciones actuales no sea sustentable, en cuanto determinaría la contaminación de los pozos con concentraciones superiores a las de potabilidad.

También la prosecución de la extracción con los ritmos actuales presenta riesgos en cuanto la posición actual de la interfase agua dulce-agua salobre parece corresponder a una condición transitoria. La evolución futura simulada sugiere que por efecto de 'upconing' hacia los pozos de extracción se puedan tener en el futuro problemas de salinización también con el ritmo actual de extracción.

Se puede concluir pues que es necesario monitorear adecuadamente la posición de la interfase agua salobre - agua dulce en la zona al noreste de Santo Domingo de manera tal de mejorar el estado actual de los conocimientos y seguir la evolución del fenómeno en el futuro. Se sugiere llevar a cabo el monitoreo mediante la ejecución de perfiles periódicos de salinidad en pozos perforados para este propósito y completados como integración de la red de control de la intrusión marina existente. Los pozos tendrán que estar ubicados posiblemente a lo largo de un alineamiento perpendicular a las isolíneas de la piezometría observada y tendrán que alcanzar profundidades adecuadas para interceptar a la interfase agua dulce-agua salobre. Con referencia a la distribución simulada de la concentración salina en las condiciones actuales, se puede estimar que la profundidad de los pozos tendrá que ser tal que permita el monitoreo de la concentración salina a cotas de por lo menos -160 ÷ -170 m s.n.m. a distancias de aproximadamente 18 km del mar.

7.1.10 Recursos hídricos y reservas hídricas

El sistema acuífero subterráneo de la Planicie Costera Oriental se caracteriza por una enorme riqueza de recurso potencialmente aprovechable. La recarga directa por infiltración ha sido estimada en efecto en el ámbito del estudio hidrológico en un valor total del orden de los $1465 \cdot 10^6$ m³/año sobre una superficie total útil de 6542 km², con referencia a un año promedio. Se trata de un valor comparable con el utilizado en el ámbito de las actividades de modelización ($1200 \cdot 10^6$ m³/año), de las cuales se ha excluido el sector al O de la ciudad de Santo Domingo (Haina, San Cristóbal, Nizao), en cuanto relativamente distinto y aislado bajo el perfil hidrogeológico del sistema principal. Por lo demás aun en las condiciones más críticas de años secos con tiempo de retorno igual a 10 años, el valor total estimado en el orden de los $920 \cdot 10^6$ m³/año (-27% respecto de la referencia promedio anterior) permanece muy elevado.

A estos valores de recarga directa podemos agregar sin más contribuciones laterales de pertinencia de la Cordillera Central, al O, y de la Cordillera Oriental, al N; estas contribuciones, estimadas en el ámbito de las actividades de modelización de las aguas

subterráneas por exigencias de calibración (faltan sin embargo datos para un eventual control y confirmación), permanecen de todas maneras pequeñas y poco relevantes en porcentaje.

Por último el papel de los cursos de agua es muy articulado y de todas maneras importante respecto del sector subterráneo; en las partes más altas de sus cursos y no obstante la presencia frecuente de formaciones finas en afloramiento (ej. sector de Monte Plata), éstos condicionan generalmente la marcha piezométrica, tanto que se trate de condiciones de drenaje (ej. alto curso del río Ozama) como que se trate de condiciones de alimentación (río Duey).

En las partes más meridionales, escurren generalmente en formaciones calcáreas o directamente en las calizas arrecifales (bien visibles en afloramiento en las laderas marcadas de muchos de los cursos de agua); éstos se presentan por lo tanto en continuidad directa con los sistemas acuíferos, representan sus condiciones en el entorno muy rígidas y dividen de hecho al área de estudio en una serie de sub-áreas relativamente independientes una de otra. Del balance general redactado al término de las actividades de modelización de las aguas subterráneas se deduce una alimentación total al sistema subterráneo superior a los 30×10^6 m³/año. Este dato, evaluado como diferencia entre volúmenes en alimentación y en drenaje, debe leerse una vez más con prudencia, dada la falta de una red capilar de medidas sobre el retículo hidrográfico entero, y debe entenderse como una indicación en la dirección de un pequeño aumento en porcentaje de la recarga al sistema subterráneo (véanse también Anexos Memorias n°13 y 14).

Para concluir pues podemos sintetizar que la estimación de la recarga directa es en su conjunto representativa de la recarga total, menos algún punto en porcentaje. Obviamente, además de la referencia al año promedio (utilizado en el curso de las actividades de modelización de las aguas subterráneas) debe tenerse en la debida cuenta la referencia al año seco con tiempo de retorno igual a 10 años, en cuanto es representativo de las condiciones más críticas.

7.1.11 Utilización de las aguas subterráneas

Las explotaciones son en esta área de entidad muy elevada, considerando la extensión y la carga demográfica de los centros urbanos principales (Santo Domingo, San Pedro de M., La Romana y Salvaleón de Higüey), el desarrollo de las actividades productivas y comerciales, como así también la existencia de centros turísticos muy afamados, desde la zona de Boca-Chica-Juan Dolio-Guayacanes, a la Central Romana, hasta el sector de Bávaro-Punta Cana en la extremidad oriental de la isla. Las producciones agrícolas son en cambio, contrariamente a lo que sucede en otras áreas de estudio (ej. Planicie de Azua), predominantemente secas (caña de azúcar y pastos en primer lugar): por lo tanto los consumos para fines agrícolas son generalmente limitados. En todo caso, considerando la ausencia de hecho de una red de canalización de aguas superficiales, aparece evidente cómo el aprovechamiento de los recursos hídricos se concentra en el área casi totalmente en el sector subterráneo.

A parte de las consideraciones cualitativas, la evaluación cuantitativa de la entidad de las explotaciones es en cambio muy compleja, por la substancial falta de datos exhaustivos y fiables. Por lo tanto en el ámbito del proyecto nos hemos concentrado en un esfuerzo de recopilación, sistematización y verificación crítica de los datos existentes (por lo general de fuente INAPA y CAASD, para el Distrito Nacional – área de Santo Domingo) y de nuevos datos (a través de estimaciones directas en campo, entrevistas con la población local,

evaluación indirecta sobre la base del tamaño de las cisternas o bien del número de familias abastecidas por eventuales obras de captación). El único dato directo y cierto es el relativo a los contadores volumétricos instalados en el curso del proyecto. Estos contadores están presentes en número relativamente exiguo y no pueden (ni debían) suministrar un cuadro exhaustivo de los consumos. Sin embargo ellos han permitido una verificación de las estimaciones indirectas disponibles y han puesto en evidencia algunas veces una sobreestimación en los datos suministrados por los gestores de las redes de acueductos. Las razones pueden tal vez remontarse a hipótesis optimistas de utilización de los pozos, en áreas donde a menudo su funcionamiento resulta condicionado por motivos de gestión como por la discontinuidad en el suministro de energía eléctrica.

Aun con los límites apenas indicados, se puede sin embargo tratar de hacer una estimación de las tomas sobre la base de los datos INAPA Y CAASD (red de acueductos del Distrito Nacional – Santo Domingo), observando sobre todo que los campos de pozos de la capital funcionan realmente con continuidad. Los datos en cuestión indican tomas totales elevadas del orden de los $150 \cdot 10^6$ m³/año de pertinencia del sector subterráneo. Por lo que atañe específicamente a los campos de pozos de Mata Mamón, Los Marenos, El Naranjo, La Catalina y La Joya – todos ubicados al NE de la capital y destinados al abastecimiento hídrico de la misma – el valor total de las tomas resulta del orden de los $80 \cdot 10^6$ m³/año, absolutamente congruente como orden de magnitud con los $90 \cdot 10^6$ m³/año indicados en otras sedes y utilizados en el ámbito de la actividad de modelización de las aguas subterráneas.

Por lo tanto, sobre la base de los datos demográficos y de las estimaciones de consumo individual (150 l/habitante/día), oportunamente incrementadas para tener en cuenta las actividades productivas y comerciales existentes, se ha procedido a una evaluación de las tomas en los centros principales restantes. Estas estimaciones han sido verificadas de nuevo críticamente a la luz de informaciones directas (véase el campo de pozos de San Pedro de M. al ENE de la ciudad) y a través de una revisión crítica con las partes interesadas (continuidad de funcionamiento, número de pozos realmente existentes, modalidades de aprovechamiento, ...). A estos datos se les han agregado o desagregado en el territorio los derivados de las estimaciones en las áreas turísticas, para las cuales está disponible el cuadro de las presencias diarias, todo sobre la base de consumos individuales del orden de los 650-700 l/turista/día y teniendo de todas maneras en cuenta la presencia de estructuras recreativas de fuerte impacto (piscinas, campos de golf, ...). El valor conclusivo total ha resultado del orden de los $50-60 \cdot 10^6$ m³/año; sin embargo consideramos que los valores reales podrían ser aun superiores, y podrían imputarse a las fuertes pérdidas a través de las líneas de drenaje preferenciales con rumbo N-S.

En este cuadro general, las estimaciones de campo ($11.2 \cdot 10^6$ m³/año) y los datos adquiridos a partir de los contadores volumétricos ($7.5 \cdot 10^6$ m³/año) no concurren en la evaluación de las tomas totales, a no ser por su función de control cruzado respecto de las demás estimaciones disponibles.

7.1.12 Vulnerabilidad

Los resultados de la aplicación del método DRASTIC en el área de estudio, reproducidos en el Mapa 10/1, delinean un cuadro de la vulnerabilidad local que puede detallarse de la siguiente manera.

De una visión de conjunto del área de estudio emerge de inmediato el elevado grado de

vulnerabilidad (de alto a muy alto) que caracteriza a toda la franja costera, con amplitud más reducida en el tramo entre Santo Domingo y La Romana, y expandiéndose considerablemente en el sector oriental, entre La Granchorra y Punta Macao.

En la diferenciación dentro de esta franja juegan un papel fundamental, tanto el desarrollo o no de fenomenologías kársticas, como la subyacencia de la napa freática, que sufre la fuerte influencia de la presencia de escarpes morfológicos (terrazas marinas) y, limitadamente al sector oriental, tectónicos.

En términos siempre generales, las áreas interiores están caracterizadas en cambio por una vulnerabilidad en conjunto intermedia. Especificando, pero, mientras que la presencia de suelos pesados y coberturas arcillosas residuales llevan hacia una clase de vulnerabilidad menor al O del Río Casuí, como atestigua la frecuente yuxtaposición entre áreas de vulnerabilidad intermedia y áreas de vulnerabilidad baja, al E del mismo río la vulnerabilidad intermedia caracteriza a todo el interior de la planicie, o por lo menos al constituido por las litofacies de pertinencia del sistema de plataforma carbonática. En este caso se evidencian, al contrario, dos amplios sectores de protección menor en las partes altas del curso de los ríos Chavón y Soco.

Sólo la planicie intensamente cultivada al S y al E de Salvaleón de Higüey, está caracterizada por una reducción de la vulnerabilidad respecto de los adyacentes sectores calcáreos, en virtud de litologías más finas en los depósitos de relleno de la cuenca.

La observación de las condiciones en los valles de mayor desarrollo de los principales ríos del área de estudio, hace resaltar inmediatamente el tramo terminal del río Ozama, donde la predominancia de depósitos arcillosos determina un mayor grado de protección local de la napa. La situación es muy distinta en el río Haina donde las granulometrías determinan una alta vulnerabilidad local.

En el cuadro de la vulnerabilidad intrínseca del área de evaluación definido así, el hecho de que en el sector considerado se concentren muchas de las actividades productivas del País, y que éstas, limitadamente a la industria y al turismo, se desarrollen principalmente en la franja costera, determina situaciones de extremada criticidad, que necesitan ser manejadas con mucha atención, para evitar comprometimientos dramáticos de los recursos hídricos subterráneos.

En el sector oriental la falta de centros poblados de relieve y la ausencia de actividades productivas de fuerte impacto (industrias, cultivos agrícolas tratados químicamente) limita los riesgos a los centros turísticos principales de Bávaro y Punta Cana, cuyo abastecimiento hídrico deriva exclusivamente del aprovechamiento de los acuíferos locales. La elevada vulnerabilidad de estos sectores plantea consiguientemente el problema de la adecuada protección local de los puntos de abastecimiento y de la planificación correcta del desarrollo de las actividades productivas en el lugar.

En el sector costero occidental, la situación resulta ser más delicada vista la presencia, además que de importantes instalaciones turísticas (La Romana, Guayacanes, Boca Chica), de grandes centros urbanos (San Pedro de Macorís, La Romana, San Cristóbal) a los cuales están asociadas, en las respectivas zonas francas, actividades industriales de distinta naturaleza, aun de fuerte impacto potencial sobre la calidad de las aguas subterráneas (véase capítulo 2).

El comprometimiento general debido a los efectos de la salinización costera de los acuíferos locales, no plantea sin embargo un problema de riesgo potencial en términos de abastecimiento para uso humano, sino en términos de riesgo asociado a los efectos de contaminación sobre las aguas marinas. Además, una posible regresión de los fenómenos de salinización, consiguiente a un manejo más correcto de los recursos hídricos del interior, vería la parcial infructuosidad de los efectos de mejoramiento por causa de las contaminaciones locales en acto.

Precisamente por causa de la presencia de las principales fuentes de abastecimiento

hídrico de las ciudades costeras, incluyendo también la capital Santo Domingo, la parte interna de la planicie, aunque esté caracterizada por una vulnerabilidad inferior, requiere una atención particular en virtud de las obvias consecuencias que provocaría una contaminación del sistema acuífero local. Además, a parte de este riesgo inmediato, el decaimiento cualitativo, generalizado o areal, de las aguas subterráneas, plantearía un problema, igualmente importante, de reducción de las áreas explotables también en sectores distintos de los que actualmente están en ejercicio.

En tal sentido, la presencia de numerosas descargas de residuos urbanos presentes tanto en las zonas interiores como en el límite interior de las facies calcáreas de más alta vulnerabilidad (San Pedro de Macorís, La Romana) ponen de manifiesto la urgencia de una atenta evaluación de las efectivas condiciones de colocación de dichas instalaciones.

7.1.13 Recarga inducida

Los resultados de las actividades de análisis en la oficina y de comprobación en el campo (cap. 6.13) desarrolladas para llegar a la identificación de sitios idóneos para realizar ensayos de recarga inducida en superficie (acondicionamiento de cauces y balsas), pueden ser así sintetizados (por más detalles, véase el Anexo Memorias n° 21):

- por lo que se refiere al bajo curso de los ríos de interés (Nigua, Haina, Ozama, Higuamo, Soco, Cumayasa, Dulce, Chavón, Duey (Yuma), Maimón y Anamuya), incluyendo por lo tanto áreas (efectivas o presuntas) de avance de la intrusión marina, no están satisfechos de hecho los requisitos morfo-hidrogeológicos y del medio ambiente necesarios para garantizar eficacia y utilidad a intervenciones de recarga inducida. En particular:
 - acondicionamiento de cauces:
son las características granulométricas del lecho (ríos Haina, Ozama, Higuamo, Maimón y Anamuya), de calidad (ríos Nigua, Haina, Ozama, Higuamo, Dulce y Duey-Yuma) y de turbidez de las aguas (ríos Haina, Ozama, Higuamo y Soco), hidrológicas (ríos Cumayasa, Maimón y Anamuya), hidrodinámicas (ríos Nigua y Duey-Yuma) y las relaciones del sistema napa-río (ríos Ozama y Dulce), las que principalmente hacen que se deba excluir la realización de obras de acondicionamiento del cauce de cualquier tipo.
Por lo que atañe al río Chavón, las características morfológicas (desarrollo muy reducido de depósitos aluvionales de granulometría gruesa) y el difícil acceso (el río corre encajonado en las calizas arrecifales) hacen que se deba excluir de hecho la posibilidad de efectuar intervenciones técnicamente sustentables en el cauce.
 - balsas:
lo que resulta de las actividades desarrolladas lleva de hecho a excluir la posibilidad operativa de realizar de todos modos tales intervenciones esencialmente porque no están satisfechos los requisitos morfo-hidrogeológicos (ríos Haina, Ozama, Higuamo, Soco, Cumayasa, Dulce, Chavón, Duey-Yuma, Maimón y Anamuya), de calidad y turbidez de las aguas (ríos Nigua, Haina, Ozama, Higuamo, Soco, Dulce y Duey-Yuma), hidrológicos (ríos Cumayasa, Maimón y Anamuya) y las relaciones del sistema napa-río (ríos Ozama y Dulce).
- por lo que se refiere a los ríos Yabacao y Tosa y al curso medio de los ríos Nigua, Soco y Cumayasa, no están satisfechos los requisitos morfo-hidrogeológicos y del medio

ambiente necesarios para garantizar el hecho que sea factible realizar un ensayo eficaz de recarga inducida. En particular:

- acondicionamiento de cauces:

son las características granulométricas del lecho (ríos Yabacao y Tosa), hidrológicas (río Cumayasa), las relaciones del sistema napa-río (río Nigua) y de turbidez de las aguas (ríos Yabacao, Tosa y Soco) las que hacen que se deba excluir la realización de obras de acondicionamiento del cauce de cualquier tipo.

- balsas:

lo que resulta de las actividades desarrolladas lleva de hecho a excluir la posibilidad operativa de realizar de todos modos tales intervenciones esencialmente porque no están satisfechos los requisitos morfológicos (ríos Soco y Cumayasa), hidrogeológicos (ríos Yabacao y Tosa), de turbidez de las aguas (ríos Yabacao, Tosa y Soco) y las relaciones del sistema napa-río (río Nigua).

7.2 Aguas superficiales

7.2.1 Régimen hidrológico y recursos hídricos

El sistema de las aguas superficiales, desde el río Nigua hasta el río Maimón, se caracteriza por (tab. 7.2.1./1 y Anexo Memorias n° 13):

- elevados valores de las escorrentías naturales promedio anuales, del orden de los $1860 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$;
- significativa variabilidad temporal:
 - con referencia a los ríos Nigua, Soco, Chavón y Duey, la escorrentía en años hidrológicamente secos constituye apenas el 55.7% (T=5 años) y el 44.2% (T=10 años) de la escorrentía promedio;
 - los valores mínimos de la escorrentía (Q_{365}) presentan un elevado campo de variabilidad, en particular en el sector oriental entre el río Soco y el río Anamuya, con certeza mayor que en las demás áreas de interés del estudio; sector donde se encuentran también los valores más altos (mayores de 0.50) del coeficiente de variación hiperanual;
- régimen hidrológico de tipo torrencial aunque sea permanente, con referencia a los cursos de agua que nacen de la Cordillera Central. En las zonas más bajas, caracterizadas por formaciones de caliza organógena, la contribución directa a la escorrentía superficial es bastante omisible, el retículo hidrográfico poco desarrollado, el régimen hidrológico local de tipo esporádico (por ej. ríos Brujuela y Cumayasa) y las aguas escurren en superficie sólo en correspondencia de episodios pluviométricos importantes, excepto el río Dulce, alimentado, aguas arriba de la ciudad de La Romana, por emergencias de aguas subterráneas;
- elevados valores del rendimiento promedio: la zona nordeste (ríos Maimón, Anamuya, donde se encuentra el máximo valor con referencia a las estaciones hidrométricas consideradas en el estudio, Duey-Yuma y Chavón) y la zona noroeste (ríos Higuero e Isabela, afluentes del río Ozama, y Haina), en coherencia con las características climáticas y litológicas de las áreas de captación.

Las características del régimen natural de las escorrentías arriba enumeradas ponen en evidencia cómo aun frente a valores promedio elevados, la efectiva capacidad de utilización en el tiempo del recurso hídrico está de hecho limitada, en particular en el sector oriental, por la significativa variabilidad hiperanual de las escorrentías mismas. La garantía de disponer en condiciones de relativa estabilidad temporal de recursos hídricos en cantidad significativa requeriría necesariamente la realización de obras de embalse-regulación, también de regulación plurianual aun de tamaño significativo (elevados valores de la evaporación, del orden de los 2000 - 2300 mm/a).

Por lo que atañe a la identificación de la entidad promedio mensual de la escorrentía torrencial y del flujo base, fue preciso basarse en el análisis de los datos medidos en las secciones hidrométricas del INDRHI (Anexo Memorias n° 13); análisis desarrollado según el método de los caudales mensuales característicos (véase Anexo Memorias n° 14, Apéndice A) y confirmado también por el análisis de la rama descendente (curva de agotamiento) del los hidrogramas de los ríos Chavón, Duey-Yuma, Soco y Ozama, hidrogramas relacionados con temporadas de lluvia antecedentes relativamente secas en sentido estadístico.

El examen del análisis (Anexo Memorias n° 14) revela que la contribución media del flujo

base, relacionada con las características hidrogeológicas de las cuencas altas (litotipos que afloran de tipo fisurado), es, en términos generales, bastante modesta y alcanza desde un mínimo del 13% (río Anamuya) hasta un máximo alrededor del 45% (ríos Maimón y Haina), con valores alrededor del 30% en las cuencas de los ríos Ozama y Soco y del 24% en las cuencas de los ríos Chavón y Duey.

7.2.2 Utilización de las aguas superficiales

El nivel de explotación de las aguas superficiales en la Planicie Costera Oriental no es muy extenso en sentido relativo hacia otras áreas del País (véanse Tab. 7.1.11./1, 7.2.2./1-2 y Anexo Memorias n° 17).

Al margen se recuerda en efecto que aproximadamente el 54% del actual caudal de explotación (aguas superficiales) de los sistemas de aprovechamiento urbano de la CAASD para el área de Santo Domingo está satisfecho con recursos hídricos exteriores procedentes del río Nizao (Planicie de Baní, véase Memoria Final n° 2).

La zona más afectada por las utilizaciones del recurso hídrico superficial es la occidental, ríos Haina y Ozama, en particular:

- cuenca del río Haina:
 - utilización para riego: caudal de operación promedio 0.79 m³/s, máximo 1.8 m³/s;
 - utilización para aprovechamiento urbano (aguas potables): caudal de explotación alrededor de los 4.8 m³/s, CAASD y INAPA (el sistema Haina-Manoguayabo I de la CAASD consiste en una galería de infiltración en el río Haina y un campo de pozos en la cuenca baja del indicado río);
- cuenca del río Ozama:
 - utilización para riego: caudal de operación promedio 1.46 m³/s (canales Capita Yabacao y Yabacao);
 - utilización para aprovechamiento urbano (aguas potables): caudal de explotación 0.30 m³/s (CAASD) con previsión de ulteriores captaciones por aproximadamente 3.00 m³/s (CAASD).

El río Haina presenta una utilización del recurso hídrico superficial muy elevado, indicativamente superior al 50% de la escorrentía promedio natural anual, situación representativa de un nivel de utilización del recurso tendenciosamente crítico, con elevada probabilidad de operar en condiciones de sequía socio-económica.

Viceversa, el nivel actual y previsto de utilización de los recursos hídricos del río Ozama no indica condiciones de posible criticidad, además la entidad de las escorrentías derivadas en promedio de los canales de riego de la sub-cuenca del río Yabacao satisface ampliamente la hidroexigencia estimada (alrededor de los 16-24*10⁶ m³, en función de la eficiencia global de riego) para las zonas de riego de interés.

En el sector de la Planicie Costera Oriental comprendido entre el río Higuamo y el río Anamuya, tanto por las características del régimen de las escorrentías superficiales antes mencionadas (pár. 7.2.1), como por las vigentes prácticas agrícolas (agricultura predominantemente de tipo secaño), la utilización del recurso hídrico superficial es exclusivamente para aprovechamiento urbano (aguas potables).

En conjunto el caudal de explotación es de alrededor de los 1.1 m³/s, la obra de toma más importante es la del Central Romana en el río Chavón en proximidad de la

desembocadura ($Q = 0.757 \text{ m}^3/\text{s}$).

El nivel de utilización de los recursos hídricos es, de todas maneras, en términos cuantitativos, extremadamente modesto y, por lo tanto, tal que no da lugar a situaciones de posible criticidad. La única advertencia es que siendo la utilización de tipo hidropotable, es necesario garantizar la calidad del recurso hídrico utilizado.

Por último, el sector comprendido entre el río Maimón-Yonú y el río Nisibón está afectado por utilidades del recurso hídrico para fines de riego. Sin embargo, del cotejo entre los valores estimados de la hidroexigencia bruta para riego, alrededor de los $72 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ (sector Maimón-Yonú) y de los $34 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ (sector Nisibón), del caudal promedio de operación de los sistemas de riego, alrededor de los $15.8 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ (sector Maimón-Yonú) y de los $4.1 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ (sector Nisibón) y de las escorrentías naturales disponibles (río Mamón), emergen posibles situaciones críticas ligadas tanto al desequilibrio entre caudales promedio de operación e hidroexigencia bruta, como a la entidad del recurso hídrico potencialmente utilizable, que en particular en años secos con frecuencia igual a 5, años pueden ser estimados sobre la base de consideraciones de similitud hidrológica en aproximadamente $55 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$, valor de todas maneras insuficiente para satisfacer la hidroexigencia bruta para riego, teniendo en cuenta también la necesidad de garantizar un caudal ecológico para el cauce.

7.3 Agronomía - Edafología

7.3.1 Campaña agronómica y edafológica

La zona examinada está constituida por la planicie que se extiende en la porción oriental de la República Dominicana que, partiendo de los pies de los relieves montañosos, desciende hacia el Mar Caribe. Los suelos se han formado, en las altitudes intermedias e inferiores, sobre las barreras y formaciones carbonáticas de origen marino; en las altitudes superiores se han formado sobre rocas predominantemente silíceas. Además, sucesivos depósitos sedimentarios incluidos entre las formaciones de origen marino están presentes sobre todo en las altitudes intermedias.

Desde el punto de vista de las texturas y de las velocidades de infiltración, en la zona examinada los suelos están distribuidos con un gradiente de texturas que procede desde las altitudes más altas con suelos arcillosos hasta aquellas más bajas con suelos esquelético-arcillosos, para llegar cerca de la costa a suelos delgados y ricos de esqueleto.

La investigación edafológica ha permitido evaluar la existencia de áreas susceptibles al riego; éstas han sido subdivididas por clases de susceptibilidad, según criterios de carácter agronómico, así como está indicado en el pár. 6.9.2. L'indagine pedologica ha permesso di valutare l'esistenza di aree suscettibili per l'irrigazione; queste sono state suddivise per classi di suscettibilità, secondo criteri di carattere agronomico, così come indicato nel par.6.9.2.

De la evaluación de los datos elaborados y de la cartografía producida, se han identificado, en el interior de la Planicie Costera Oriental 327093 ha susceptibles al riego, de éstas, 11765 caen en la segunda clase, 311887 en la tercera y 3441 en la cuarta clase. Los suelos presentan generalmente limitaciones debidas a sus características químico-físicas, ad aspetti topografici e a deficienze di drenaggio.

Dalla valutazione dei dati elaborati e della cartografia prodotta, sono stati identificati, all'interno della Valle de Neiba 10.747 ha suscettibili di irrigazione; di questi, 2370 ricadono in prima classe, 3195 in seconda e 5182 nella terza classe. I suoli presentano generalmente limitazioni dovute alle loro caratteristiche chimico-fisiche.

7.3.2 Identificación de zonas con regadío actual

Los cultivos más importantes resultan ser arroz, frijoles, maíz y maní. Los usos agrícolas del suelo varían de una zona con regadío a otra. En el caso de Higüey, son cuatro los usos más importantes:

- arroz;
- frijoles;
- maíz, maní;
- plátano y yuca.

En la zona con regadío de Sabana de la Mar y Bayaguana predomina el monocultivo de arroz.

No entran en las estadísticas agrícolas del INDRHI las grandísimas extensiones cultivadas con caña de azúcar y los pastos tanto naturales como mejorados pertenecientes a las industrias azucareras.

En toda la Planicie costera, la caña se cultiva en seco.

–La superficie total agrícola del la Planicie Costera Oriental es igual a 540.342 ha; es oportuno reiterar que dicha superficie comprende superficies brutas, que comprenden taras como carreteras, caminos, canales, terrenos no cultivados. Además ha sido delimitada según el criterio de la predominancia, habiéndose realizado el levantamiento~~relevamiento en una escala de síntesis. La superficie totale agricola della Valle de Neiba è pari a 58.363 ha; è opportuno ribadire che tale superficie è comprensiva de superficies brutas, que comprenden taras como carreteras, caminos, canales, terrenos no cultivados. Inoltre è stata delimitata secondo il criterio della prevalenza, essendo stato il rilevamento effettuato ad una scala di sintesi.~~

En el interior de esta superficie, se han individualizado 14.492 ha con regadíos, de las cuales 12.914 34.000 con aguas superficiales, 1.578 con aguas subterráneas.

Por lo que concierne en fin a la demanda de agua de cada uno de los cultivos, la siguiente tabla contiene las necesidades netas anuales por unidad de superficie (1 hectárea). Para los datos de mayor detalle, se remite a las tablas adjuntas del Anexo 16.

Cultivos	DEM. NETA ANUAL(mm)
maíz	222,04
arroz	954,9
musáceas	973,64
yuca	402,89
frijol	180,22
otros cultivos	257,29
pastos	331,04

8 CANTIDADES EXPLOTABLES DE AGUA

A lo largo del Proyecto se ha evidenciado:

- **aguas superficiales:**
el nivel de explotación de las aguas superficiales es bastante modesto en sentido relativo hacia otras áreas del País. En efecto las características del régimen natural de las escorrentías ponen en evidencia cómo aun frente a valores promedio elevados, del orden de los $1860 \cdot 10^6$ m³/a, la efectiva capacidad de utilización en el tiempo del recurso hídrico es de hecho limitada, en particular en el sector oriental, por la significativa variabilidad hiperanual de las escorrentías mismas, tanto anuales promedio como mínimas diarias promedio. La garantía de disponer en condiciones de relativa estabilidad temporal de recursos hídricos en cantidad significativa requeriría necesariamente la realización de obras de embalse-regulación, también de regulación plurianual, de tamaño significativo.
A tal propósito, se recuerda que aproximadamente el 54% de los recursos hídricos superficiales actualmente empleado por la CAASD para el abastecimiento del área de Santo Domingo procede de la cuenca exterior del río Nizao-embalse de Valdesia (Planicie de Baní).
Por lo que atañe a los recursos hídricos superficiales se individualizan de todas maneras dos sub-áreas específicas, cuenca del río Haina y el sector comprendido entre los ríos Maimón.- Yonú y Nisibón, que presentan niveles de utilización elevados, indicativamente superiores aun al 50% de la escorrentía promedio natural anual; situación representativa de un nivel de utilización del recurso tendenciosamente crítico, con elevada probabilidad de operar en condiciones de sequía socio-económica.
- **aguas subterráneas:**
por lo que concierne a los recursos hídricos subterráneos, se ha estimado, sobre la base de los datos de la recarga directa, un valor potencialmente utilizable del orden de los $1465 \cdot 10^6$ m³/a, con referencia al año promedio, valor que se reduciría a $920 \cdot 10^6$ m³/a para el año seco con tiempo de retorno de 10 años.
A nivel regional los consumos estimados de aguas subterráneas resultarían ser de entidad limitada si se los comparase con el recurso natural utilizable, aun tratándose del área más importante por presión demográfica, actividades industriales, comerciales y turísticas.
Sin embargo el cuadro aparentemente confortante resulta ser extremadamente complejo en escala local evidenciando criticidades tanto con referencia a la cantidad de recurso disponible, como, más a menudo, a la calidad del recurso mismo.
En tal sentido, el área al noreste del Distrito Nacional con sus campos de pozos (Mata Mamón, Los Marenos, El Naranjo, La Catalina y La Joya) presenta un nivel de explotación del orden de los $90 \cdot 10^6$ m³/a, igual a casi el 50% del recurso utilizable con referencia al año promedio.
Por lo que concierne a los aspectos cualitativos, que quedan fuera sensu stricto del presente análisis, se debe sin embargo recordar que los fenómenos de intrusión marina están difundidos y son extremadamente críticos a lo largo de toda la franja costera como así también en correspondencia de las áreas de extracción significativa para fines potables, como en el caso de la ciudad de Santo Domingo y de San Pedro de Macorís.

9 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

9.1 Resumen de datos generales y socio-económicos

El área de estudio, denominada "Planicie Costera Oriental, (ver Fig. 1/1), está comprendida entre 18° 12' 17" y 18° 57' 41" de Latitud Norte y entre 68° 19' 10" y 70° 09' 03" de Longitud Oeste y tiene una superficie de aproximadamente 7,194 Km².

Está dividida entre las provincias de: San Cristobal, Monte Plata, San Pedro de Macorís, Hato Mayor, El Seibo, La Romana, La Altagracia y el Distrito Nacional y comprende en todo o en parte el territorio de 23 municipios. El entorno de la capital Santo Domingo está excluido del estudio.

La población de los 23 municipios se estima hoy a 1,356,586 habitantes de los cuales 624,030 (46%) viven en zonas rurales y 732,556 (54%) en áreas urbanas. De estos, el 48.6% son hombres y el 51.4% mujeres.

La tasa media de analfabetismo se calcula en un 20.1%. La población económicamente activa representa el 36.0 % de la población total. La mayoría son trabajadores asalariados (68.6%) y trabajadores por propia cuenta (20.7%).

Los sectores que más contribuyen a la economía y que son las mayores fuentes de empleo son, en orden de importancia las industrias manufactureras (29.9%), los servicios (18.92%) la agricultura (16.68%) y el comercio y turismo (14.05%).

Las industrias están esencialmente concentradas en el área de la Capital y en las diferentes zonas francas. Los sectores de producción principales son los siguientes: textil, alimentario, agregados y materiales para la construcción y químico.

Los principales productos agrícolas son representados por la caña de azúcar, los tomates, la yuca y frutas (naranjas, toronjas).

El sector ganadero produce esencialmente vacunos y aves.

No existe una actividad pesquera desarrollada y organizada a nivel industrial. Sólo existe la pesca de bajura con barcos pequeños a distancias no muy grandes de la costa. Los productos principales son moluscos (lambí), crustáceos (cangrejo, langosta y camarones), pescado de arrecife (mayormente chillo, dorado, carité, machuelo, cojinúa y tiburón).

El turismo es muy desarrollado en la costa donde se encuentran hoteles y restaurantes en cantidad elevada. Los centros turísticos principales son, de Oeste a Este: Boca Chica, Juan Dolio, La Romana, Bayahibe, Punta Cana, Bávaro-El Cortecito.

Por lo que atañe al turismo ambiental, existen el Parque Nacional del Este (península de la Granchorra e isla Saona) y el Parque Submarino de La Caleta cerca del Aeropuerto de Las Américas.

Las actividades mineras/extractivas, a parte la producción de arena y grava para la construcción (esencialmente concentrada en el sector occidental del área de estudio), son muy reducidas. Se extraen esencialmente Caliza (San Cristóbal y Distrito Nacional) Arcillas calcáreas (Distrito nacional, San Pedro de Macorís y Hato mayor), Arcillas industriales (Monte Plata).

La red de autopistas y carreteras, es de calidad media en el área. Hay una densidad bastante elevada en el Distrito Nacional y en San Cristobal. Hay pocas carreteras en todo el sector al Este de la Capital.

En el área de estudio se encuentran 4 aeropuertos localizados en la zona costera Sur y Sudeste (San Isidro, Las Américas, La Romana, Punta Cana) y 3 puertos (Andrés de Boca Chica, San Pedro de Macorís y La Romana).

La distribución de electricidad es muy carente tanto en las áreas urbanas, como en las zonas rurales, donde el servicio no alcanza todos los pueblos.

El servicio telefónico es bueno, así como, en general, la cobertura celular.

9.2 Clima

Los datos climáticos del área hidrológica del proyecto fueron tomados de las estaciones meteorológicas del INDRHI (15 estaciones pluviométricas/gráficas, período 1961-1996 y 4 estaciones climatológicas, período 1967-1996), de la ONAMET (9 estaciones, período 1961-1990 y 1997) y pluviométricas del Central Romana (4 estaciones, período 1964-1996).

La característica principal del clima en el área de la Planicie es la elevada variabilidad espacial entre las zonas costeras alrededor de las ciudades de San Pedro Macorís y de La Romana, caracterizadas por una evapotranspiración potencial de referencia ETPo (de Hergreaves-Samani) mayor que la precipitación en todos y/o casi los meses del año, y las zonas húmedas de la Cordillera Central, en particular las cuencas de los ríos Haina, Nigua y Ozama (períodos húmedos hasta 5-7 meses).

El promedio de lluvia anual de la zona hidrogeológica de la Planicie es de 1370.9 mm, a nivel de estación los valores anuales medios oscilan entre 873 mm (La Romana) y 2688 mm (Presa de Isa, río Haina). La variación mensual de la precipitación presenta un régimen de tipo bimodal con época lluviosa en la primavera (en términos generales en el mes de mayo) y en verano-otoño (desde agosto hasta noviembre) y con sequía en el invierno y en junio-julio; pero si la marcha intranual está bastante homogénea en todo el territorio examinado, los meses máximos y mínimos relativos tienen una elevada variabilidad de un lugar al otro, y también entre estaciones bastante cercanas. En la Planicie Costera Oriental, entre las cuencas de los ríos Haina y Anamuya incluidas, el coeficiente de variación CV de la lluvia total anual asume, en sentido estadístico, el mismo valor en toda el área, es decir $CV = 0.243$.

Se ha verificado, por las series históricas de la lluvia anual, como representativo a escala regional, el modelo logarítmico-normal por sus mejores resultados absolutos y relativos respecto a los modelos normal-Gauss y gamma-Pearson II, mientras que la ecuación de Hergreaves-Samani ha sido elegida como método de referencia para evaluar la evapotranspiración potencial ETPo.

La temperatura media del aire presenta valores anuales que fluctúan entre menos de 25 °C y más de 26 °C, la variación intranual de la temperatura media oscila entre 3 y 4 °C, y, en todo el área de estudio, el período de mayores temperaturas corresponde a los meses de julio a agosto y lo de mínima a los meses de enero y febrero.

El promedio anual de la ETPo en el la Planicie es de 1669.4 mm, a nivel de estación los valores anuales medios oscilan entre 1560 mm (Naranja de China) y 1970 mm (La Romana), mientras que los valores de la evaporación de tanque A medidos oscilan 1482 mm (Naranja de China) y 1775 mm (El Seibo).

Para mayores detalles, refiérase al Anexo Memorias n° 1.

9.3 Orografía, Hidrografía y Geomorfología

La Planicie Costera Oriental representa un área de morfología plano-ondulada afectada hacia el mar por una serie de escarpaduras de erosión de distintos órdenes consiguientes a varias fases de descenso del nivel eustático.

En la zona oriental están presentes también numerosas escarpaduras de origen tectónico que determinan, en caso de intersección, evidentes dislocaciones en los bordes de las terrazas de erosión.

El variado nivel de base ha inducido además una intensa acción erosiva de los ríos presentes en el área, que en aquéllos comprendidos entre el río Higuamo y el río Yuma ha producido una quebrada que caracteriza buena parte de los trechos terminales de los cursos de estos ríos.

Desde el punto de vista del pattern hidrográfico dichos ríos muestran un típico retículo dendrítico de baja densidad con organización jerárquica casi inmediata diferente del irregular, a veces meandriforme, de los ríos de la parte oriental para los cuales se observa el desarrollo de cauces más bien amplios como testimonio de una mayor erosionabilidad de los terrenos.

Un kársismo evidente y bien reconocible, aunque no es continuo, está presente en toda la franja costera, de pertinencia de las facies calcáreas bioconstruidas, entre Santo Domingo y el río Cumayasa..

Al este del río Chavón, el karsismo se vuelve nuevamente muy intenso y reviste probablemente un carácter de continuidad, por un área muy extensa, mostrando un claro vínculo entre las formas del karstismo y los elementos de la neotectónica cuaternaria.

Los Ríos más importantes que se encuentran en el área de la Planicie Costera Oriental son, desde el O:

- *Río Nizao;*
- *Río Nigua;*
- *Río Haina;*
- *Río Ozama:* el más importante de toda la región con una cuenca hidrográfica muy amplia;
- Entre los ríos Ozama y Higuamo faltan salidas al mar de ríos. En el interior de esta franja los ríos (ej. *río Brujuelas*) tienden a desaparecer en sumideros kársticos;
- *Ríos Higuamo;*
- *Río Soco;*
- *Río Cumayasa;*
- *Río Dulce;*
- *Río Chavón;*
- *Río Yuma- Duey;*
- *Río Anamuya;*
- *Río Maimón.*

Cuencas lacustres y lagunas permanentes se concentran principalmente en el extremo oriental del área.

9.4 Geología y tectónica

9.4.1 Geología

La Planicie Costera Oriental está dominada arealmente por las facies calcáreas y calcáreo-terrágenas ligadas a la instauración, en edad cuaternaria, de una extensa plataforma carbonática limitada por arrecifes coralinos, limitadas al Norte por los relieves, de naturaleza predominantemente magmática, de la Cordillera Central y de la Cordillera Oriental.

Estos relieves, de edad cretácico-paleogénica, son constituidos esencialmente por metavulcanitas (espilitas, queratófiros y tobas, y metasedimentos menores representativos tanto de facies clásticas como de facies carbonáticas), esquistos de composición básica y ultrabásica de bajo grado de metamorfismo, metabasaltos y metapiroclastitas, con frecuentes intrusiones de naturaleza granitoide, secuencias esquistosas de naturaleza volcánica (de metabasaltos a metarriolitas) con subordinados niveles metasedimentarios (esquistos calcáreos, cuarcitas, conglomerados), basaltos, andesitas y peridotitas serpentinizadas.

Los depósitos carbonáticos arrecifales son constituidos por una asociación de diferentes facies.

- En la franja costera (con excepción del sector a Sudoeste de Santo Domingo, donde se encuentra una alternancia de depósitos terrígenos y carbonáticos), se encuentran las facies bioconstruidas, que constituían el núcleo original del arrecife. Se presentan generalmente o como biolitas masivas (framestone), de color variable del blanco al rosa claro, o como biolitas rosado-naranja (bindstone) de aspecto brechoide, ambas con frecuentes vacuolas y cavidades primarias.
- Más en el interior se pasa generalmente a depósitos retroarrecifales (backreef), de naturaleza predominantemente detrítica, representados, tanto en transición espacial como en sucesión vertical, por toda la gradación de los litotipos previstos en la clasificación de Dunham para los carbonatos alóctonos (mudstone, wackestone, packstone y grainstone). Estos depósitos tienen desarrollo areal muy extenso en relación con la presencia de amplias lagunas internas originarias en las cuales, es plausible prever una frecuencia mayor de mudstone (lodos micríticos) en posición distal respecto del núcleo del arrecife, y un incremento del componente terrígeno acercándose a los relieves.

Depósitos de difícil colocación en tal sistema son los representados por las calcarenitas de color crema, organizadas en estratos homogéneos y homométricos, observadas entre Punta Macao y la Laguna de Bávaro. Naturaleza y aspecto de estos depósitos parecen indicativos de una facies distal de antearrecife, por cuanto la homogeneidad del sedimento parece más representativa de un ambiente de depósito litoral.

Depósitos cuaternarios de origen terrígeno están presentes sea en forma de cojines aluviales de los principales ríos del sector occidental, que como depósitos lacustres y fluvio-lacustres, estos últimos particularmente extensos en el sector de Monte Plata y de Higüey.

En la zona de estudio están incluidos sólo marginalmente los terrenos clásticos mesozoico-cuaternarios característicos del área de Bani.

9.4.2 Tectónica

La zona de la Planicie no sufre de los efectos de la tectónica reciente: sólo en el sector sudoccidental estos se se manifiestan con un sistema de fallas directas, de alto ángulo, orientadas según un trend predominante NO-SE.

La tectónica precuaternaria puede observarse sólo en los terrenos del basamento cretáceo que constituyen los relieves montañosos marginales del área de estudio donde las diferentes unidades que constituyen la Cordillera Central y la Cordillera Oriental se desarrollan en sobreposición y/o yuxtaposición según franjas alargadas en dirección NO-SE, cuyas geometrías son consecuentes a la sucesión de por lo menos 8 principales fases tectónicas, que comprenden tres distintas fases cretáceo-eocénicas de vulcanismo y plutonismo de arco insular seguidas por igual número de fases de colisión del sistema de arco, a las cuales se agregan una fase eo-miocénica de transurrencia a lo largo de fallas E-O que anticipa una fase transpresiva miocénica con interacción de las estructuras transcurrentes E-O con las más viejas estructuras NO-SE heredadas de la construcción del arco insular.

9.5 Actividades preliminares, base de datos y SIG

La realización de esta etapa preliminar, ha permitido antes de todo la planificación correcta en todos sus detalles y luego la realización en forma optimizada de las actividades de proyecto.

La primera de las actividades preliminares, fue la recopilación de los antecedentes y la colección de todos los documentos cartográficos necesarios al desarrollo del estudio.

En esta fase se pudieron recoger y sintetizar 14 informes de interés a nivel nacional (entre los cuales el Informe final del Proyecto PLANIACAS) y 4 informes específicos sobre el área de estudio, además de adquirir los documentos cartográficos de base (2 mapas temáticos en escala 1:250000 el mapa topográfico nacional en escala 1:250000 y 32 hojas del mapa topográfico nacional en escala 1:250000 relativos a la Planicie Costera Oriental).

Paralelamente se llevó a cabo el diseño del banco de datos alfanumérico (realizado en ambiente Microsoft Access 97) y la implementación del Sistema de Información Geográfica - SIG (realizado en ambiente ArcView versión 3.0a) y al desarrollo de la integración entre los dos instrumentos de trabajo.

El banco de datos alfanumérico, contiene:

- las fichas de identificación de 1489 puntos de agua de los cuales 620 pertenecen a la Planicie Costera Oriental
- las fichas de identificación de 114 estaciones de aforos de las cuales 39 se encuentran en cuencas de la Planicie Costera Oriental
- las fichas de identificación de 28 estaciones meteorológicas instaladas en el curso del proyecto, de las cuales 13 están en relación con esta área de estudio
- los datos piezométricos, de calidad de las aguas (análisis y determinaciones de campo y análisis de rutina y especiales de laboratorio, incluyendo isótopos, metales etc.. cuando ejecutados), de control de la salinidad (perfiles en pozo).

En el SIG están incluidos todas las aplicaciones y los files que permiten tanto de visualizar los diferentes parámetros del banco de datos alfanumérico y de efectuar elaboraciones específicas relacionadas con estos datos (selecciones, operaciones matemáticas), como de realizar la cartografía temática de proyecto en las escalas deseadas.

Como última actividad preliminar se realizó la primera etapa del inventario de puntos de agua con el fin de poder escoger las redes de control piezométrico, de calidad y de salinidad previstas.

En esta fase se inventariaron en la Planicie Costera Oriental 540 puntos. Entre estos, 289 resultaron aptos para ser incluidos en la red de control piezométrico, 323 resultaron aptos para la red de calidad y 151 no eran aptos, en las condiciones en las cuales se encontraron, para ser incluidos en redes de control.

Naturalmente las actividades de inventario continuaron también durante el desarrollo del proyecto, para permitir de incluir los nuevos puntos de agua realizados en el periodo del estudio y de añadir nuevos puntos en substitución de otros mientras tanto no más utilizables para las redes de control.

Al final del estudio las cantidades totales de puntos de agua inventariados es de 620, de los cuales el 94.5% son pozos y solamente 3 manantiales. De los pozos/sondeos, el

44.4% pertenecen a particulares, el 16.5% a INAPA, el 8.1% al CEA y el 4.8% al INDRHI. Los pozos se utilizan principalmente a fines domésticos (61.6%): entre los otros tipos de uso, los principales son el riego(4.7%), la industria (4.5%) y la ganadería (4.0%). Los equipos de bombeo más utilizados son las bombas eléctricas sumergibles (44.6%), las de eje vertical y los molinos de viento (ambas 19.8%).

9.6 Actividades de campo y estudios

9.6.1 Monitoreo piezométrico y actividades relacionadas

Durante el proyecto se ejecutaron 17 campañas de medidas mensuales desde Septiembre 1997 hasta Octubre 1998 y luego desde Junio hasta Agosto 1999.

Vista la variabilidad y la inestabilidad previstas por el hecho de que la casi totalidad de los puntos existentes no eran dedicados para el control piezométrico, se tomaron en cuenta para el monitoreo todos los puntos (348 por un total de 4551 medidas), donde se podía medir el nivel piezométrico para poder definir, al final de los dos años, todos los puntos potencialmente utilizables en una red de control que a la vez fueran aptos técnicamente y confiables en términos de continuidad de las medidas en el tiempo.

Como núcleo inicial se tomaron en cuenta los puntos de la red “histórica” del INDRHI (para dar continuidad a las medidas) que ya tenían un mínimo de datos en tiempo pasado.

Los puntos que se pudieron medir siempre en las campañas de monitoreo fueron 236 o sea el 67.8% del total considerado

El mapa piezométrico se realizó utilizando las cotas determinadas con el método GPS diferencial en 291 puntos de la Planicie Costera Oriental y los datos piezométricos medios calculados a partir de los datos medidos en la red del proyecto a lo largo de las 13 campañas anteriores al huracán Georges (9/97 - 9/98).

Para el diseño final de la red de control piezométrico, se tomaron en cuenta los siguientes factores:

- Distribución en el espacio y densidad de los puntos
- Confiabilidad de los datos obtenidos
- Continuidad de toma de medidas en el tiempo
- Facilidad de acceso
- Optimización entre número de puntos técnicamente aptos y recursos humanos y materiales disponibles para los controles futuros.

Tomando en cuenta todo esto, el procedimiento adoptado para definir la red de control ha sido el siguiente:

- a) Selección de todos los puntos aptos (donde se pueden realizar medidas piezométricas confiables)
- b) Reconstrucción de las isopiezas
- c) Estudio/interpretación de las mismas
- d) Selección de los puntos donde se pudieron ejecutar medidas durante todos los meses de campañas piezométricas
- e) Selección de los puntos nuevos añadidos confiables
- f) Selección de los pozos nuevos realizados en el proyecto
- g) Reunión en un mapa de trabajo de los pozos de los puntos d), e) y f)
- h) Selección entre estos, de aquellos, que satisfacen los criterios indicados más arriba en este mismo párrafo y definición de la red de control

En algunos casos específicos, (pozos/sondeos utilizados también para el control de la salinidad o cerca de ríos para comprobar las relaciones entre estos y los acuíferos), donde entonces era importante una determinación más precisa de la elevación de algunos puntos, para la determinación de la cota se utilizó el levantamiento taquimétrico.

Esta metodología se aplicó en la Planicie Costera Oriental en 16 puntos.

Los resultados se introdujeron en el banco de datos y se tomaron en cuenta para las actividades de conceptualización hidrogeológica y para la modelización.

9.6.2 Monitoreo de calidad

La actividad de monitoreo se estructuró, como preveía el contrato, en base trimestral. El número elevado de muestras y la notable amplitud del área, respecto de la viabilidad disponible, a veces ocuparon un arco temporal un poco superior al mes previsto.

De las ocho campañas originalmente previstas por el contrato, se efectuaron 4. La reducción de la actividad de control fue necesaria como consecuencia del pasaje del huracán “George” en octubre de 1998, que habiendo afectado al área del proyecto, rindió impracticable tanto la viabilidad primaria como la menor.

En total se recolectaron 823 muestras de agua de la red de calidad.

9.6.3 Monitoreos especiales (isotopos, aguas minero-medicinales, potabilidad)

En el curso del proyecto se han efectuado dos campañas de monitoreo, por un total de ocho determinaciones de O18, D, T, y una de C13 y C14.

En la primera campaña se han considerado los pozos inventariados mayormente empleados para la extracción, en las muestras tomadas en esta fase se han determinado: Oxígeno-18 (O18), Deuterio (D) y Tritio (T).

En la segunda campaña, sobre la base de los conocimientos hidrogeológicos adquiridos, se han considerado tanto los puntos de la red de calidad de las aguas como los pozos Aquater, perforados en acuíferos confinados y/o ubicados en zonas consideradas como estratégicas. En esta fase, además de las mismas determinaciones efectuadas en la fase anterior, en cinco se ha determinado también el Carbono-13 (C13) y Carbono -14 (C14).

La evaluación de las características de potabilidad de las aguas subterráneas ha sido realizada específicamente a través de una campaña de toma y análisis de 17 aguas, procedentes de pozos públicos, localizados en las áreas de estudio. Tales resultados fueron integrados con la reinterpretación, a fines de la utilización potable, de los datos relativos a las aguas de 247 pozos pertenecientes a la Red de Calidad.

Las 17 muestras tomadas expresamente para esta investigación han sido sometidas a la determinación de los parámetros químico-físicos y microbiológicos enumerados en el pár. 6.4.3. En el mismo párrafo están presentes los parámetros químico-físicos reelaborados para las muestras pertenecientes a la Red de Calidad.

En la Planicie Costera Oriental se han muestreado además 2 puntos hídricos con aguas de tipo minero-medicinal sometidos a análisis químico-físicos y bacteriológicos específicos (pár.6.4.4) que permitiesen una evaluación en términos de utilización termal.

9.6.4 Control de la salinidad y de la intrusión marina

El número total de puntos de la red de control de la intrusión marina fue de 25, cuya distribución está presentada en el mapa: “Mapa de control de la intrusión marina” (Mapa 5).

Para obviar a la escasez de puntos idóneos para la ejecución de los perfiles verticales de

salinidad, en las zonas costeras de proyecto el análisis a los fines de la individualización del fenómeno de la intrusión marina se extendió a todos los puntos de la red de control de la calidad. Para alcanzar el objetivo se llevó a cabo un análisis del contenido de cloruros relevado en todas las muestras analizadas, seleccionando punto por punto aquella con el tenor más elevado.

9.6.5 Geofísica

Objetivos específicos de la prospección geofísica fueron:

- el estudio del problema de la intrusión marina, tratando de definir la amplitud de las áreas de extensión de la misma y la determinación de cota de la interfase agua dulce-agua salada;
- en la zona de Monte Plata se intentó definir el contacto entre formaciones de origen volcánico y las calizas, por debajo de las coberturas aluviales existentes.

En el presente estudio el método de prospección empleado fue el geoelectrico (de resistividad) en su modalidad Sondeos Electricos Verticales (S.E.V.) con configuración de tipo Schlumberger.

El trabajo se ejecutó en dos campañas, en las cuales se ejecutaron:

S.E.V. con AB = 150 m	196
S.E.V. con AB = 500 m	88
S.E.V. con AB = 1000 m	54
Total S.E.V. realizados	338

Las curvas de campo fueron interpretadas inicialmente mediante los abacos de Orellana-Mooney y luego con software dedicado a la computadora.

Los resultados se presentaron en forma de secciones geoelectricas, pseudosecciones de resistividad longitudinal diferencial, o mapas de resistividad.

9.6.6 Perforación y ensayos de bombeo

Perforación

Durante los estudios ejecutados se individualizaron los siguientes objetivos específicos para los sondeos a perforar en la Planicie Costera Oriental:

- Mejorar el conocimiento geológico-estratigráfico del área de estudio.
- Servir de calibración para la interpretación de la geofísica.
- Adquirir datos relativos a los parámetros hidráulicos de los acuíferos (T, K, S).
- Constituir un embrión de red de control de la salinidad en las zonas costeras interesadas por la ingresión marina.
- Realizar pozos de control aguas abajo de zonas de explotación intensiva por parte de INAPA y/o INDRHI.
- Integrar la red de control piezométrico con pozos dedicados a este efecto.

En relación con estos objetivos específicos se realizaron en la Planicie Costera Oriental:

Sondeos entubados a aprox. 7”	
- de profundidad inferior a 75 m	11
- de profundidad entre 75 y 150 m	7
- de profundidad entre 150 y 225 m	1

Sondeos entubados a aprox. 10”	-
- de profundidad inferior a 75 m	-
Sondeos entubados a aprox. 12”	
- de profundidad inferior a 75 m	3

Total 22

Además se realizó un pozo de observación al lado de la estación meteorológica de El Peñón, cerca de San Pedro de Macorís.

De los 23 sondeos totales realizados, se ejecutaron:

- 20 sondeos con rotación directa y circulación de aire, espuma o lodo;
- 3 sondeos con método de percusión.

Ensayos de bombeo

En 14 pozos a bombear se han instalado electrobombas sumergidas; el caudal de bombeo se ha elegido de acuerdo con los observados durante la perforación.

Los niveles durante el ensayo (sea en los pozos sea en los piezómetros de observación), han sido medidos a través de sondas eléctricas con cable plano.

Para la medida y el ajuste del caudal de bombeo, se han utilizado recipientes de capacidad conocidas y cronómetros de precisión para la medida del tiempo de llenado y cuando ha estado posible, se han empleado contadores totalizadores.

La medición de los niveles han estado efectuadas a intervalos regulares, así que estas han podido quedar regularmente distribuidas en una escala logarítmica.

Se han tomado todos los cuidados necesarios para que el agua extraída no volviese al acuífero.

Al paro de la bomba, después de 72 horas de ensayo, se han medido los niveles en subida, al fin de calcular el parámetro de transmisividad también con los métodos de recuperación.

9.6.7 Integración de la red meteorológica existente

A fin de suplir la información de la red meteorológica existente del INDRHI y de la ONAMET, se instalaron 12 estaciones meteorológicas de tipo automático con alimentación por panel solar y con archivo en disco magnético de los valores medidos, es decir: precipitación, temperatura del aire, humedad relativa, radiación solar, dirección y velocidad del viento, evaporación (tanque tipo A).

La instalación de las estaciones meteorológicas fue efectuada en dos distintos momentos:

- en el mes de septiembre del año 1997 se instalaron 8 estaciones meteorológicas: Salvaleón de Higüey, El Naranjal (San rafael del Yuma), El Peñón (San Pedro de Macorís), Piedra Blanca (El Seibo), Batey Excavación (Quisqueya), Hato Mayor del Rey (Guayabal - Yerba Buena), Batey Triple Ozama (Monte Plata) y Cómate Bayaguana;
- en el mes de agosto del año 1999, consiguientemente a una variante de proyecto, se instalaron 4 estaciones ulteriores: Sabana de la Mar (para garantizar un conocimiento más completo de las características climáticas del territorio de interés), La Guama (Salvaleón de Higüey), Bayahibe (La Romana) y Cítricos Dominicanos (Villa Altagracia - El Mingolo).

La identificación de los sitios idóneos para la instalación de las estaciones meteorológicas ha sido desarrollada en dos fases: selección preliminar, en la oficina, de la distribución óptima de los sitios en los cuales ubicar las estaciones meteorológicas, y comprobación en el campo, de la posibilidad de efectuar la instalación.

Para mayores detalles, refiérase al cap. 6.7 y al Anexo Memorias n° 2, donde en particular se presentan: la ubicación de las estaciones instaladas, los valores diarios y mensuales de los parámetros climáticos medidos junto al análisis tanto de las características climáticas, como de la marcha de la precipitación y de la velocidad del viento asociadas al paso del huracán George en el mes de septiembre 1998.

9.6.8 Campañas de aforos directos e instalación regletas hidrométricas

A fin de integrar y completar la información de la red hidrométrica del INDRHI se han efectuado dos campañas de aforos (septiembre 1997 - septiembre 1998, junio 1999 - agosto 1999) en diferentes secciones de los ríos que se encuentran en la zona de estudio, red de aforos del estudio.

El diseño de la red de la primera campaña de aforos, la cual ha incluido también estaciones hidrométricas vigentes y/o suspendidas del INDRHI para alcanzar una distribución espacial óptima, ha sido desarrollado según criterios hidrogeológicos, hidrológicos, hidrográficos y económicos. En fin, se han identificado 35 lugares idóneos, en particular 34 secciones en cauces naturales y 1 en canal de riego (canal Yabacao).

En el período junio-agosto 1999 se ha efectuado una segunda campaña de aforos en las zonas hidrológico-hidrogeológicas de interés cuyo diseño ha sido desarrollado, a la luz tanto de los resultados de la primera campaña como de las modificaciones hidromorfológicas consiguientes al paso del huracán George (sept. 98), según los siguientes criterios: representatividad hidrológica hacia el régimen hidrológico y el intercambio napa-río, mejor control de los principales canales de riego y disponer de una red de referencia eficiente y eficaz como sostén para la individuación de la red hidrométrica básica de control.

Sobre la base de lo descrito anteriormente, se han considerado en total 35 secciones de aforos de las cuales 2 relativas a canales de riego (canales Yabacao y Haina).

Para mayores detalles, refiérase al cap. 6.8.1, al Anexo Memorias n° 1 y al Mapa n° 2 (Red de control hidrogeológico e hidrométrico).

Con el paso del huracán George en Septiembre de 1998, la red INDRHI de control hidrométrico mediante regletas (miras) sufrió daños muy graves, tanto por la destrucción de las infraestructuras que las sustentaban, como por la desviación del curso de muchos ríos.

Con estos acontecimientos, se presentó entonces, como prioridad absoluta, la reconstrucción de la red ya existente, con el fin de dar continuidad a las series históricas de medidas.

Fue así que de las 90 regletas disponibles, 47 se instalaron en la Planicie Costera Oriental, distribuidas en 18 estaciones, todas pertenecientes a la vieja red de control del INDRHI.

9.6.9 Actividades agronómicas y edafológicas

El levantamiento~~relevamiento~~ edafológico ha sido programado sobre la base de un plan que ha permitido una organización racional de las actividades de campo~~los levantamientos~~, junto con una homogénea distribución territorial de las mismas.

Se ha adoptado un tipo de levantamiento~~relevamiento~~ denominado “razonado”, es decir que ha tenido en cuenta las características territoriales capaces de influir sobre la génesis de los suelos.

La campaña de levantamiento~~relevamiento~~ edafológico ha consistido en:

Ejecución de 45 perfiles

Para cada perfil se han tomado en promedio tres muestras, sobre las cuales se han efectuado análisis físico-químicos específicos, útiles para la definición de la susceptibilidad al riego.

Ejecución de 400 barrenados para una correcta determinación de la textura de los suelos y para definir mejor los límites de las unidades cartográficas.

Durante la campaña se han cumplido además observaciones puntuales de los suelos, que han constituido una ulterior ayuda para la definición de las áreas susceptibles al riego;

Ejecución de 9 ensayos infiltrométricos, localizados en proximidad de perfiles representativos de cada una de las series de suelo.

Para la determinación de la susceptibilidad de los terrenos al riego, se han utilizado los datos procedentes del levantamiento~~relevamiento~~ edafológico; la susceptibilidad se ha visto en efecto como la propensión de un terreno a hospedar cultivos regadíos, considerando la existencia de eventuales limitaciones derivantes de factores físicos y edafológicos, sin tomar en consideración la eventual disponibilidad hídrica o factores de tipo socioeconómico.

Los factores físicos considerados han sido esencialmente la topografía y el drenaje.

Los factores edafológicos tomados en consideración han sido esencialmente la profundidad efectiva, la textura, la estructura, la consistencia, el color, la permeabilidad, la tasa de infiltración.

El estudio realizado ha permitido la producción de un mapa de las áreas irrigadas y de la susceptibilidad a la irrigación, que contiene las siguientes informaciones:

- áreas agrícolas no regadías
- áreas agrícolas regadas con aguas subterráneas
- áreas agrícolas regadas con aguas superficiales
- áreas agrícolas regadas con aguas mixtas
- áreas regadas ocasionalmente con aguas superficiales
- principales cultivos efectuados
- susceptibilidad a la irrigación de las áreas actualmente no regadías.
- localización de los perfiles edafológicos realizados

Para su realización, se han llevado a cabo las siguientes fases de trabajo:

delimitación de las áreas de estudio sobre la base topográfica;
fotointerpretación de fotos aéreas en escala promedio 1:40.000 en blanco y negro, derivadas de vuelos efectuados en los años 1983/1984;
verificación, actualización y terminación de la fotointerpretación a través de investigaciones e inspecciones de campo;
digitalización de las informaciones cartográficas;
construcción del mapa y de la leyenda en ambiente GIS.

En fase de elaboración, se ha procedido además a la subdivisión del territorio de estudio en clases texturales homogéneas, a fin de suministrar un valor a utilizar como input para la determinación de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos.

En el presente estudio se definen además los volúmenes de agua de riego necesarios para los cultivos en el distrito de riego. Los volúmenes de agua han sido determinados mediante la realización de un balance hídrico agronómico en relación con los cultivos presentes.

Para la determinación de dicho balance hídrico se ha adoptado un modelo agronómico, que ha requerido informaciones sobre los suelos, clima y sobre los cultivos en cuestión.

El balance hídrico permite determinar los probables volúmenes de agua que pueden ser utilizados por los cultivos, mediante la evaluación de la dinámica hídrica total en el sistema suelo-planta-atmósfera en ciertas condiciones agroecológicas dadas.

Para el cálculo de las necesidades hídricas de los cultivos, se ha tratado de suministrar contemporáneamente el dato final (en la forma más agregada posible) y todos los datos de partida, con la posibilidad de formular hipótesis variando los datos de partida, para obtener inmediatamente una respuesta, con la consiguiente variación del dato final. Para satisfacer estas exigencias se ha realizado una hoja electrónica, que se ha mantenido lo más uniforme posible para todas las estaciones meteorológicas consideradas.

9.6.10 Evaluación de la utilización del agua - Balance hídrico

La evaluación de los balances hídricos se ha basado en la interpretación, en escala de zona hidrológico-hidrogeológica y de sub-áreas internas a ellas, del estado que deriva de hecho del balance entre disponibilidades naturales y modalidad y entidad actuales de las utilizaciones, identificando las problemáticas existentes y/o posibles consiguientes a condiciones críticas y de competencia-insatisfacción entre los distintos usos.

Por lo que atañe al sector superficial, se ha procedido al análisis integrado de los resultados de los estudios hidrológico, agronómico y modelístico, prestando particular atención en la evaluación de las utilizaciones (tomas). La evaluación del balance hídrico entre oferta natural de los sistemas hidrológicos y actual nivel de las tomas de nuestro recurso hídrico ha sido referida a condiciones hidrológicas promedio y de sequía, con tiempo de retorno de 10 años, siendo estas últimas representativas de las situaciones de mayor criticidad en términos de recurso aprovechable. Con respecto al impacto de las actuales utilizaciones sobre la escurrimiento mínima residual en el cauce, se han suministrado indicaciones tanto sobre el posible valor mínimo del caudal ecológico, sobre la base sólo de consideraciones de tipo hidrológico como, donde la información disponible era suficiente, sobre el nivel actual de posible criticidad ambiental a través del cotejo entre valores medidos del caudal mínimo en el cauce y valores de posible referencia del caudal ecológico.

También por lo que atañe al sector subterráneo, se ha procedido al análisis integrado de los resultados de los estudios hidrológico, agronómico y modelístico. En particular se ha procedido a un nuevo examen de los valores de recarga, con referencia tanto a las condiciones de un año promedio como a las de un año seco, con tiempo de retorno de 10 años, siendo estas últimas representativas de las situaciones más críticas en términos de recurso aprovechable. El papel de los cursos de agua (p. ej. alimentación o drenajes) y la entidad de los intercambios con el mundo subterráneo, la evaluación de los flujos a lo largo del área costera) y la evaluación de las explotaciones han completado el cuadro de referencia.

La evaluación de las explotaciones ha sido objeto de un análisis más pormenorizado. Los datos demográficos elaborados por la Oficina Nacional de Estadística, han permitido una evaluación indirecta de los consumos potables. Las informaciones disponibles por lo que se refiere al sector turístico (número de presencias diarias, existencia de infraestructuras, etc...) han sido evaluadas a la luz de los consumos individuales generalmente muy elevados y del impacto de todas maneras elevado en términos de demanda hídrica. Por lo que concierne a los consumos para fines agrícolas, se han considerado críticamente los resultados del estudio agronómico, con particular referencia a los cultivos practicados, a las exigencias hídricas netas y brutas (con hipótesis de eficiencia total generalmente de alrededor del 30%), a la extensión areal de los cultivos.

Se ha concluido el estudio con un examen crítico del balance hídrico, con particular atención en poner en evidencia las condiciones críticas en términos cuantitativos (aprovechamiento elevado respecto de la recarga total) y la división, donde era necesario, en sub-áreas de distinta criticidad. Aunque no concerniese estrictamente al tema del balance hídrico, se han relevado también aquellas situaciones críticas desde el punto de vista cualitativo, con particular referencia a las áreas costeras y a los fenómenos de intrusión salina en acto.

9.6.11 Cartografía temática

En el curso del proyecto se ha preparado tanto una cartografía hidrogeológica en escala 1:50.000 (Mapa 9/1) como una cartografía de vulnerabilidad en escala 1:100.000 (Mapa 10/1)

Para la producción de la cartografía hidrogeológica, se ha procedido al examen de la bibliografía y de la cartografía existente, para realizar luego una verificación sistemática de la geología mediante inspecciones preliminares, fotointerpretación a partir de fotos aéreas y controles de terreno.

Una vez definido el cuadro geológico de mayor fiabilidad, contextualmente a las informaciones hidrogeológicas adquiridas en el curso del trabajo de campo, se ha procedido a la sucesiva caracterización hidrogeológica, utilizando como criterios de referencia lo de la Leyenda UNESCO del año 1970, que pero han sido seguidos en líneas generales; del momento que la complejidad y la articulación de las características sobre todo del medio poroso y de los acuíferos del sistema arrecifal, han sugerido la oportunidad de una articulación de la clasificación mucho más compleja, que ha subdividido el territorio sobre la base de las siguientes clases hidrogeológicas:

- Formaciones porosas: acuíferos de permeabilidad muy alta y muy productivos.
- Formaciones porosas: acuíferos de permeabilidad variable y productividad media.
- Formaciones porosas: acuíferos de permeabilidad variable, pero normalmente poco productivos.
- Formaciones fisuradas: acuíferos extensos y productivos (permeabilidad a menudo alta).
- Formaciones fisuradas: acuíferos locales o discontinuos (permeabilidad moderada o variable).
- Acuíferos en caliza arrecifal organógena de permeabilidad elevada de origen primario y/o secundario.
- Acuíferos en caliza arrecifal con litofacies detrítica de permeabilidad de variable a buena, esencialmente de origen primario.
- Acuíferos en sucesiones terrígeno-carbonáticas, donde el componente terrígeno es predominante. Permeabilidad localmente buena.
- Formaciones no acuíferas o con acuíferos muy locales.

La representación cartográfica del territorio subdividido sobre la base de las clases enumeradas arriba ha sido completada con piezometrías, elementos geológico-hidrogeológicos, elementos hidroquímicos y elementos hidrográficos.

Los mapas de vulnerabilidad realizados son mapas de vulnerabilidad integrada que consisten en la representación cartográfica conjunta de los centros de peligro potencial y de la vulnerabilidad intrínseca.

Tales mapas han sido producidos adoptando el método de evaluación paramétrica DRASTIC, que permite, mediante índices numéricos, una evaluación estandarizada de la susceptibilidad a la contaminación de las aguas subterráneas (vulnerabilidad intrínseca) para cargas generales de agentes contaminadores localizables en la superficie.

Este método los siete parámetros principales en el control del movimiento de las aguas en los terrenos naturales. Éstos son: *Profundidad al acuífero; Recarga neta; Tipo de acuífero; Tipo de suelo; Pendiente; Impacto del tipo de zona vadosa; Conductividad hidráulica.*

A cada uno de estos factores, relativamente a las clases de variación consideradas, se le atribuye un puntaje (rating) a multiplicar sucesivamente por un peso (weight) atribuido por convención al factor mismo. De la sumatoria de los productos de los factores considerados se obtiene un índice numérico (Índice DRASTIC) que expresa la vulnerabilidad potencial del acuífero que se encuentra por debajo del punto considerado. Sobre la base del campo de variación arriba citado se definieron de esta manera las siguientes clases de vulnerabilidad:

<i>Vulnerabilidad</i>	<i>Índice Drastic</i>	
	muy baja	23 - 64
baja	65 - 104	
intermedia	105 - 145	
alta	146 - 185	
muy alta	186 - 221	

La parcial indisponibilidad de los datos relativos a algunos factores limitó la evaluación de vulnerabilidad a áreas reducidas respecto de la extensión de la zona de estudio.

9.6.12 Modelización aguas subterráneas

Se ha implementado un modelo matemático bidimensional de flujo, mediante el código de cálculo de diferencias finitas Modflow, como cobertura del sector que desde el Distrito Nacional (Santo Domingo – Monte Plata) se extiende hacia la extremidad oriental del área de estudio (Bavaro – Punta Cana). El modelo se calibró en condiciones estacionarias, teniendo como referencia la piezometría promedio del período 9/97-9/98.

Una sucesiva actividad de modelización se refirió a la extensión del modelo a condiciones transitorias en un período de 30 años de duración. No se trató sin embargo de una calibración propiamente dicha, dado el número exiguo de informaciones acerca de los coeficientes de almacenamiento y sobre todo la falta total de datos históricos de piezometría y de toma.

Para las simulaciones de la intrusión marina, se ha utilizado el simulador numérico de reservorio TOUGH2, código de cálculo 3D de diferencias finitas integrales, saturado/no saturado y densidad dependiente. Entre los módulos termodinámicos disponibles en TOUGH2, se ha elegido el módulo EWASG, que permite la simulación del flujo multifásico de mezclas constituidas por agua, cloruro de sodio y un gas no condensable, el aire para esta aplicación específica.

La simulación numérica de la intrusión marina ha sido llevada a cabo:

- efectuando simulaciones numéricas en secciones verticales, en geometría 2D, colocadas transversalmente a la línea de costa y aproximadamente perpendiculares a las isopiezas;
- utilizando mallas de discretización cartesianas bidimensionales con pasos en sentido horizontal y vertical aceptables desde el punto de vista de la onerosidad de la solución numérica y tales que diesen una descripción suficiente del fenómeno.

En el ámbito de la Planicie Costera Oriental, se ha querido investigar dos distintas situaciones con dos modelos en sección vertical:

- al oeste de San Pedro de Macorís, se ha querido simular la intrusión marina en una zona caracterizada por limitadas extracciones pero con una piezometría

- extremadamente deprimida, con isopieza de 1 m s.n.m. a una distancia de aproximadamente 20 km del mar;
- al este de Santo Domingo, se ha querido simular el fenómeno de la intrusión marina en un área caracterizada por fuertes extracciones y por una piezometría que conserva aún a 20 km de distancia del mar un nivel superior a 5 m s.n.m.

9.7 Resultados obtenidos

9.7.1 Caracterización hidrogeológicas de las diferentes formaciones geológicas y acuíferos presentes

Las formaciones geológicas presentes en el área de estudio han sido caracterizadas desde un punto de vista hidrogeológico utilizando como base de clasificación las especificaciones de la leyenda UNESCO.(1970). Esta base ha sido necesariamente adaptada, articulándola ulteriormente, a fin de adecuarla aún mas a las características de los sistemas estudiados.

Las tipologías hidrogeológicas identificadas para las formaciones en el área de estudio han sido:

- *Porosas, sede de acuíferos de permeabilidad alta y muy productivos.* Depósitos aluviales gruesos (ríos Nigua, Nizao y a los segmentos superiores del río Higuamo).
- *Porosas, sede de acuíferos de permeabilidad variable y productividad media.* Generalidad de los depósitos aluviales, tanto recientes como actuales, de granulometría media,
- *Porosas, sede de acuíferos locales y discontinuos, de permeabilidad moderada o baja, poco productivos.* Depósitos cuaternarios s.l., tanto aluviales como eluviales, en la franja a los pies de la montaña al O del río Magua; Depósitos cuaternarios de la llanura al S de Salvaleón de Higüey; Depósitos aluviales recientes y actuales, de naturaleza predominantemente fina, de los ríos Haina y Ozama.
- *Fisuradas, sede de acuíferos extensos y productivos, de permeabilidad normalmente alta.* Formaciones litoides carbonáticas que afloran, por extensiones generalmente reducidas, en los relieves marginales.
Fisuradas, sede de acuíferos locales y discontinuos, de permeabilidad medio-baja. Formaciones ígneas s.l. de los relieves de la Cordillera.
- *Calcáreas bioconstruidas, sede de acuíferos extensos y productivos, de permeabilidad de medio-alta a elevada;* Facies organógenas, a veces karstificadas, que caracterizan a toda la franja costera de Santo Domingo a Bavaro
- *Sucesión calcáreo-detrítica sede de acuíferos extensos, generalmente productivos, con permeabilidad generalmente de media a medio-alta:* Sucesiones predominantemente calcárea con niveles detríticos de distintas facies granulométricas (desde las brechas calcáreas hasta los lodos calcáreos), de la franja interna de la Planicie Costera.
Sucesión terrígena con intercalaciones calcáreo-detríticas de frecuencia variable, sede de acuíferos de permeabilidad generalmente de media a medio-baja: Depósitos cuaternarios indiferenciados que afloran al N de Santo Domingo, presente por detrás de los terrenos carbonáticos cuaternarios.
- *Formaciones de baja permeabilidad y sin acuíferos significativos:* Margas en el sector de Nizao; Formaciones esquistosas aflorantes en los relieves marginales; Depósitos palustres litorales.

La determinación a través de los ensayos de bombeo de algunos parámetros hidrogeológicos (tab.6.6.2/1) de las principales formaciones acuíferas carbonáticas ha evidenciado un valor máximo de T típica de calizas arrecifales ($2.92 \times 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$).

En promedio se encuentran valores mucho más bajos, entre $10^{-2} \div 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, con variaciones de 2– 3 órdenes de magnitud desde las calizas arrecifales y depósitos finos del interior.

9.7.2 Pozos, sondeos y manantiales

El número de pozos en la Planicie Costera Oriental es con mucho el más elevado respecto de todas las áreas de estudio in virtud tanto de la presencia de grandes usuarios urbanos como hotelero-turísticos.

Al contrario los pozos para uso agrícola, aunque estén difundidos, son generalmente de importancia reducida.

En general se trata de pozos, aun relativamente profundos, a menudo en condiciones semiconfinadas. En efecto son intercalaciones finas, tanto en el interior de las calizas arrecifales que se encuentran sobre todo en las áreas retroarrecifales donde pueden ser predominantes.

No se han individualizado manantiales de relevancia en el área de estudio, con la excepción del manantial La Toma, en el sector di San Cristóbal.

Manantiales menores, típicos de zonas de emergencia de la napa en correspondencia de bajos topográficos relativos, están presentes de todas maneras en proximidad de Bayahibe, en un sector caracterizado por calizas de elevada karstificación.

9.7.3 Piezometría

Piezometría y variaciones piezométricas en el tiempo

De forma sintética, se puede concluir lo siguiente en los diferentes sectores de la Planicie Costera Oriental.

– Sector de Santo Domingo-Monte Plata.

Muy importante es el papel drenante llevado a cabo por los ríos Ozama y La Savita que influyen la dirección de la isopiezas y las líneas de flujo. Las cotas piezométricas colocan alrededor de los 10 m s.n.m.

– Sector de Santo Domingo-San Pedro de Macorís.

Las isopiezas se alejan mucho de la línea de costa y aumentan su densidad próximo a los afloramientos de la Cordillera Oriental o, de todos modos, no lejos de los mismos. La isopieza 10 m se encuentra a aproximadamente 20-25 km de la línea de costa y la isopieza 5 m aún a aproximadamente a 15 Km por efecto combinado de las influencias de los ríos en los límites y sobre todo de la magnitud de los aprovechamientos de las aguas subterráneas, que al NE del área urbana de Santo Domingo, en presencia de pozos de alimentación del acueducto, alcanzan valores críticos también en relación con los fenómenos de intrusión de la cuña salina. Los bajos gradientes son a poner en relación también con un gradual aumento de los valores de transmisividad a medida que se aproximan los litotipos bioconstruidos del área costera.

– Sector de San Pedro-La Romana.

El sector en cuestión ve una gradual y marcada migración de las isopiezas desde el N hacia el S, desde la extremidad occidental, a partir del río Higuamo hasta La Romana. En esta última, la isopieza 10 m se encuentra justo al Norte de la ciudad, a no más de 4-5 km de la línea de costa. Los gradientes piezométricos, aumentan rápidamente.

– Sector de La Romana-Salvaleón de Higüey-Punta Cana

Sector caracterizado por una gradual migración de la dirección del flujo subterráneo de N-S a NO-SE. Inmediatamente aguas abajo de la población de Salvaleón de Higüey, en la extensa llanura cuaternaria, se evidencia una zona de recarga generalizada al sistema

subterráneo.

– Sector de Bávaro-Bahía Maimón

La piezometría tiene aquí un comportamiento muy diferente del sector anterior, con direcciones de flujo de OSO a ENE con isopiezas que se alejan de la costa en relación con los valores muy elevados de transmisividad inducidos también por fenómenos generalizados de karstificación..

– Sector al O de la capital (Santo Domingo-Nizao)

Este sector está caracterizado por una mayor diferenciación geológica. Los datos piezométricos disponibles son pocos, las correlaciones no siempre son posibles por presencia de horizontes piezométricos locales. De toda forma, a gran escala, los flujos son de NO a SE y se nota que existe un limitado alejamiento de la isopieza cero con respecto de la línea de costa.

Algunas ambigüedades permanecen, como consecuencia de la extensión del área de estudio y, por lo tanto, de la densidad de los datos disponibles, con referencia a los siguientes problemas:

- Posible existencia de condiciones de multiacuífero. en el sector interno de la Planicie.
- Relaciones de intercambio con la red hídrica superficial que no siempre son de evaluación clara.

Por lo que se refiere al análisis de las variaciones piezométricas en el tiempo, los mínimos se observan esencialmente alrededor del mes de Mayo (entre Marzo y Agosto) y los máximos tienen mayor frecuencia en Septiembre y se sitúan esencialmente entre este mes y Diciembre.

Las variaciones anuales son generalmente muy reducidas (en su mayoría inferiores a 1 m).

Por lo que atañe a las variaciones de los niveles medios después del 1970, con los pocos datos históricos en nuestra posesión se puede observar que:

- Los niveles generalmente han bajado con los años en las zonas de S. Pedro de Macorís y de Boca del Soco (variaciones que pueden alcanzar valores superiores a los 2 metros), de los Llanos, de Guerra y de San Cristóbal (variaciones mucho más reducidas con valores superiores a los 25 cm), de Guaymate y de Salvaleón de Higüey (variaciones superiores a 1 m).
- Los niveles generalmente han subido en la zona entre San Rafael del Yuma y Boca de Yuma con variaciones a veces superiores a 1 metro.
- Los valores se han quedado más o menos iguales en la zona al norte de Santo Domingo.

Proposición de una red de control piezométrico

La red de control propuesta cuenta con 68 puntos, de los cuales 20 (29%) están dedicados solamente a la red y 48 (71%) privados. Los puntos de la red sin bomba son 20 (29%) y con bomba instalada son 48 (71%).

La repartición en el espacio de los puntos propuestos está en acuerdo con los criterios generales indicados en el párrafo 6.3.1.

9.7.4 Calidad de las aguas subterráneas y caracterización hidroquímica

La caracterización que emerge del análisis de los datos químicos, relativos a las aguas subterráneas, pone en evidencia una situación generalmente homogénea en todas la zona objeto de investigación del presente proyecto. Están presentes tres grandes familias hidroquímicas:

- Aguas bicarbonato-alcálico téréreas;
- Aguas bicarbonato-alcálicas;
- Aguas clorurado-alcálicas.

El primer grupo representa las aguas típicas de la recarga regional, que aun aumentando su contenido salino a lo largo de su recorrido, mantienen generalmente valores de salinidad inferiores a 1 g/l.

El segundo grupo representa áreas litológicamente independientes (sector a), estas aguas varían su contenido salino de 0,1 a más de 1 g/l.

El tercer grupo esencialmente se coloca a lo largo de la franja costera, poniendo en evidencia con su mayor o menor extensión la influencia de la interacción aguas dulces subterráneas y agua marina. En general se trata de aguas de salinidades superiores a 1 g/l. La presencia de este tipo de aguas en sectores muy lejanos a la costa podría ser imputable a la lixiviación de depósitos de tipo lagunar costero.

Además de las muestras incluidas en los tres grupos arriba citados, existe un número exiguo de muestras que se distingue o por la predominancia de uno de los componentes alcálico-téréreas, o bien por la pertenencia a otra tipología hidroquímica. Estos casos son aislados, y por lo tanto están relacionados con situaciones locales, cuyos detalles litoestratigráficos se desconocen.

El nivel de comprometimiento de los acuíferos está puesto ulteriormente en evidencia tanto por la distribución del contenido de cloruros como por los datos relevados en los perfiles verticales de salinidad efectuados.

De la investigación específica sobre la calidade potable emerge el marcado decaimiento de las aguas subterráneas a lo largo de toda la franja costera por fenómenos de salinización ligados a la intrusión de agua marina. Dicha franja de comprometimiento resulta ser particularmente extensa en las áreas de mayor urbanización (Santo Domingo, San Pedro de Macoris, La Romana).

El decaimiento cualitativo por presencia de cloruros se registra también en las zonas del interior pero de manera circunscrita y sin un vínculo aparente con aguas de origen marino. La distribución de la potabilidad en las zonas interiores muestra un cuadro cualitativo mejor en el segmento entre Santo Domingo y San Pedro de Macoris respecto de todo el sector oriental donde son más frecuentes las indicaciones de prohibiciones temporáneas de potabilidad de las aguas subterráneas, principalmente causadas por ascensos no tolerables del contenido salino.

Al norte de la capital la potabilidad resulta mayormente garantizada limitando, y no continuamente, los parámetros fuera de norma a los nitritos/ al oeste de Monte Plata, y a valores reducidos del pH en algunos pozos al sur de la misma población.

Los dos manantiales muestreados en la Planicie Costera Oriental para el estudio de las aguas minero-medicinales, deben considerarse como un recurso que merece ser

valorizado. Para tales aguas pueden hacerse las siguientes consideraciones:

- las propiedades químicas que las caracterizan las hacen resultar de interés para clásicas utilizaciones terapéuticas; uno de los manantiales presenta un caudal tal que puede considerarse posible el aprovechamiento comercial en establecimientos termales de discretas dimensiones, adecuados también para la utilización en baños terapéuticos en piscinas y para actividades que requieren un elevado consumo de aguas minerales;
- los análisis efectuados en el ámbito del proyecto, desde el punto de vista bacteriológico, no permiten declarar la loro pureza microbiológica, que deberá ser verificada con tomas por lo menos estacionales; de todas maneras consideramos extremadamente improbable la contaminación de la napa hídrica que, además de todo, debe considerarse profunda; deberán, de todos modos, individualizarse, con estudios de detalle sucesivos, sugeridos en el Anexo No 9, eventuales contaminaciones superficiales.

En general se puede considerar que los 2 manantiales podrían tener perspectivas termales interesantes y dignas de ser estudiadas, teniendo en cuenta el discreto flujo turístico en la República Dominicana, la buena capacidad de recepción y los largos períodos de posible utilización de los establecimientos termales en el año.

9.7.5 Salinidad e ingresión marina

La red utilizada fue muy afectada por la disponibilidad muy escasa de puntos aptos para la ejecución de las mediciones con la sonda multiparamétrica. En efecto, la sonda puede ser utilizada sólo en pozos libres de cualquier impedimento para evitar la pérdida del instrumento.

La franja costera de esta área puede subdividirse en cuatro sectores;

1. sector al Este de la península de la Gran Chorra;
2. sector comprendido entre S. Pedro de Macorís y La Romana;
3. sector comprendido entre la ciudad de S. Domingo y S. Pedro de Macorís;
4. sector comprendido al Oeste de la ciudad de S. Domingo.

En el primer sector se releva un bajo gradiente piezométrico comprobado por un elevado contenido de cloruros y por una interfase medida inferior a –50 m sobre el nivel del mar. La buena coincidencia entre las distintas metodologías de investigación y evaluación de los datos indican que con el actual nivel de aprovechamiento de las aguas subterráneas la franja comprometida varía desde pocos kilómetros hasta quince; considerando también la segunda franja, o sea aquella considerada como le alta probabilidad de comprometimiento, se alcanzan zonas ubicadas a más de 20 km de la costa.

En el segundo sector el fenómeno resulta arealmente más contenido en la parte central, mientras que tanto en el límite oriental como en el occidental se nota una tendencia a la expansión del área comprometida. Todos los datos disponibles en este sector resultan bastante congruentes entre sí, e indican la presencia de una franja comprometida continua a lo largo de toda la costa. El comprometimiento resulta decididamente más extenso en la parte occidental, mientras que en la oriental se evidencia una amplia franja de posible comprometimiento.

En el tercer sector las informaciones disponibles resultan ser en general congruentes entre sí y con la cuantificación del fenómeno como orden de magnitud. La presencia de altos tenores de cloruros y la baja carga hidráulica, aun a distancias muy elevadas de la línea de costa, dan la medida de una situación muy grave. Sin embargo las estimaciones de la batimetría de la interfase agua dulce – agua salada, obtenidas con la relación de Ghybern – Herzberg, en algunos sectores resultan muy superiores a los valores obtenidos de los perfiles verticales efectuados, poniendo en evidencia deshomogeneidades estructurales de los acuíferos no relevadas por la reconstrucción de la situación hidrogeológica y por la conceptualización de los modelos de flujo. El modelo para la intrusión salina, efectuado en una única sección en el área, confirmó tanto la gravedad de la situación como la congruencia de los datos.

En el cuarto sector, aun no disponiendo de medidas directas, se evidencia un fenómeno de intrusión que afecta a una franja de aproximadamente 2 km de profundidad, repartida al 50% entre la situación de comprometimiento total y aquella de elevado riesgo de comprometimiento.

9.7.6 Resultados análisis isotópicas

La situación que se delinea pone en evidencia una progresiva disminución de los isótopos pesados desde el Oeste hacia el Este. La variación podría estar relacionada tanto con la dirección de traslación de las precipitaciones, como con la distinta altimetría de las áreas de recarga, que resultaría ser más elevada en el sector occidental. Ambos fenómenos tienden a generar aguas de precipitación isotópicamente empobrecidas. Los datos en nuestro poder no son suficientes para definir cuál de los dos fenómenos es el que predomina. Sin embargo, esta señal de recarga está parcialmente enmascarada por los dos procesos físicos que afectan a la reserva subterránea:

mezcla con agua de mar;
evaporación.

La franja costera resulta ser pues el lugar de los fenómenos de mezcla, entre las aguas dulces y las marinas. Al contrario, las aguas de la franja más interna presentan trazas variamente evidentes de fenómenos de evaporación, que han tenido lugar, probablemente, durante la infiltración.

El contenido de Tritio, indica la presencia di circuiti sia con recarga anterior al pico registrado en los primeros años '60, sia con ricarica attuale.

La mayor parte de los modelos de datación aplicados, a losos valores de C13 y C14, indica una edad actual para las aguas.

9.7.7 Relaciones ríos-acuíferos

Por lo que atañe al intercambio napa-río, con referencia a las zonas más bajas, caracterizadas por formaciones de caliza organógena de permeabilidad de origen primario y/o secundario (zonas de color morado oscuro y medio en la fig. 7.1.8./1), el examen de las variaciones a lo largo de los ríos del caudal medido en condiciones hidrométricas de agua baja en las secciones de la red de aforo del proyecto y el análisis de las curvas de agotamiento del río Chavón en las estaciones hidrométricas del INDRHI revela que:

- en conjunto los ríos Tosa-Ozama, Yabacao-Ozama, Higuamo y Dulce drenan la napa, con un valor promedio (nov.'97-ago.'98) que fluctúa entre los $2 * 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ (ríos Tosa y Yabacao) y los $12 * 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ (río Higuamo). Pero el régimen del intercambio de los ríos Yabacao y Higuamo no es constante, es decir hay meses en los cuales prevalece el drenaje mientras que en otros la alimentación, hecho relacionado también con la marcha climática;
- los ríos Brujuela y Cumayasa juegan un papel en la alimentación de las napas subterráneas;
- el río Chavón, con referencia a la sub-cuenca encerrada por las secciones de Santa Lucía, Guanito (Sanate) y Mira Pato, parece jugar un papel de alimentación de la napa (alrededor de los $1.5 * 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$, análisis de la rama descendente de hidrogramas relacionados con temporadas de lluvia, otoño-invierno '74, relativamente secas en sentido estadístico);
- el río Duey-Yuma, con referencia al trecho aguas arriba de San Rafael del Yuma, en el tramo entre las secciones de aforo en El Mamey (código 240001) y en El Naranjal (código 240002), parece alimentar los sistemas acuíferos con un valor de recarga estimado alrededor de los $3.7 * 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ (período dic.'97-ago.'98).

Para mayores detalles, refiérase a los Anexos Memorias n° 13 y 14.

9.7.8 Evaluación de la recarga - infiltración eficaz

La zona hidrogeológica de interés, la cual se presenta en la Fig. 7.1.8./1 sacada del Mapa 9/1: Mapa hidrogeológico Planicie Costera Oriental, tiene un área total de 7243.8 km², una precipitación promedio anual de 1370.9 mm y una evapotranspiración potencial de referencia de 1669.4 mm.

Ésta se caracteriza por formaciones contribuyentes a la recarga de tipo poroso (azul), fisurado (verde) y de caliza organógena de permeabilidad de origen primario y/o secundario (morado), las cuales, en conjunto, tienen una superficie de 6542.6 km², esto es el 90% de la superficie total.

En términos generales, la fuente principal de las aguas subterráneas es la recarga pluvial directa; la contribución por recarga lateral e infiltración de escorrentía superficial en los cauces es, en términos relativos, bastante reducida.

En conjunto, teniendo en cuenta las características morfológicas, hidrogeológicas e hidrológicas, han sido individuadas 20 sub-zonas homogéneas (véase cap. 6.8.3, Fig. 7.1.8./1 y Anexo Memorias n° 14).

En conjunto (véase Tab. 7.1.8./1) la recarga pluvial directa en la zona hidrogeológica de interés alcanza los siguientes valores:

- años secos (T=10 años): 920.82 * 10⁶ m³/a;
- años secos (T=5 años): 1071.32 * 10⁶ m³/a;
- año medio: 1465.32 * 10⁶ m³/a;
- años húmedos (T=5 años): 1767.02 * 10⁶ m³/a;
- años húmedos (T=10 años): 1989.08 * 10⁶ m³/a.

Para mayores detalles, refiérase a los cap.7.1.7, 7.1.7 y al Anexo Memorias n° 14.

9.7.9 Vulnerabilidad

De una visión de conjunto del área de estudio emerge de inmediato el elevado grado de vulnerabilidad (de alto a muy alto) que caracteriza a toda la franja costera, con amplitud más reducida en el tramo entre Santo Domingo y La Romana, y expandiéndose considerablemente en el sector oriental, entre La Granchorra y Punta Macao.

En términos siempre generales, las áreas interiores están caracterizadas en cambio por una vulnerabilidad en conjunto intermedia.

La observación de las condiciones en los valles de mayor desarrollo de los principales ríos del área de estudio, hace resaltar inmediatamente el tramo terminal del río Ozama, donde la predominancia de depósitos arcillosos determina un mayor grado de protección local de la napa. La situación es muy distinta en el río Haina donde las granulometrías determinan una alta vulnerabilidad local.

En éste cuadro de vulnerabilidad, el desarrollo en esta área de muchas e importantes actividades productivas determina situaciones de extremada criticidad, que necesitan ser manejadas con mucha atención.

En el sector oriental la falta de centros poblados de relieve y la ausencia de actividades limita los riesgos a los centros turísticos principales de Bávaro y Punta Cana.

En el sector costero occidental, la situación resulta ser más delicada vista la presencia, además que de importantes instalaciones turísticas (La Romana, Guayacanes, Boca Chica), de grandes centros urbanos (San Pedro de Macorís, La Romana, San Cristóbal) a los cuales están asociadas, en las respectivas zonas francas, actividades industriales de distinta naturaleza.

La parte interna de la planicie, aunque esté caracterizada por una vulnerabilidad inferior, requiere una atención particular en virtud de importancia del sistema acuífero local, donde se sitúan de las principales fuentes de abastecimiento hídrico de las ciudades costeras.

9.7.10 Modelos matemáticos de flujo de las aguas subterráneas

El modelo de flujo, implementado en el ámbito del proyecto, se utilizó para una simulación de previsión a largo término (30 años) frente a una hipótesis de fuerte incremento de las tomas en los sectores de los campos pozos para uso potable de las ciudades de Santo Domingo (incremento del 50%) y de San Pedro de Macorís (incremento del 100%), como así también en todas las áreas turísticas de Boca Chica, Juan Dolio, Guayacanes, La Romana y Bavaro - Punta Cana (incremento del 300%). La hipótesis de incremento se basa, en términos generales, tanto en las estimaciones de crecimiento demográfico como en la idea de una auspiciosa extensión de la red de acueductos existente. Por lo que se refiere en fin a los distritos turísticos, se hizo referencia a las estadísticas sobre las presencias turísticas previstas.

Los resultados son de gran interés e individualizan el área al E de Santo Domingo como la más crítica, en términos de impacto piezométrico en escala regional, con variaciones máximas del orden de diversos metros en correspondencia de los campos pozos (5-8 m) y gran extensión areal de los fenómenos. Siendo la simulación relativa a condiciones transitorias, se puede también observar que estas variaciones se realizarían en tiempos muy rápidos; ya después de 1 año del aumento de las explotaciones, la configuración piezométrica sería muy parecida a aquella calculada al final de la simulación (30 años) por lo menos en proximidad de los campos pozos. Considerando la criticidad de esta área por lo que atañe a los fenómenos de intrusión salina (y sin considerar aquí los fenómenos de "up-coning", o sea de subida de la interfase salina a nivel local, en relación con explotaciones fuertes y concentradas) y a pesar de que ya las condiciones actuales son

bastante críticas, esta hipótesis de incremento de los consumos es inaceptable.

Por lo contrario, los resultados en los otros sectores de estudio indican generalmente variaciones piezométricas muy pequeñas. Generalmente en los sectores costeros la elevada transmisividad, la presencia de líneas preferenciales de flujo subterráneo y la proximidad del mar Caribe limita las variaciones piezométricas de tipo regional. Sin embargo hablamos de sectores siempre muy críticos por lo que se refiere a los fenómenos de intrusión salina (también a nivel local por los mencionados fenómenos de “up-coning”).

Consideraciones adicionales se requieren para el sector de San Pedro de Macorís. A pesar de variaciones piezométricas aun pequeñas (hasta máximos de 1 m), sin embargo el área se presenta como extremadamente crítica. Las piezometrías actuales son muy bajas, en relación sea con las elevadas transmisividades que con el papel que juegan los ríos Soco e Higuamo, cuyas cotas son muy bajas aún a muchos kilómetros al interior. Lo fenómenos de intrusión salina ya estan afectando a los campos pozos de abastecimiento al acueducto de la ciudad y dichas variaciones piezométricas resultan críticas en relación con las cotas actuales ya muy próximas al nivel del mar.

La sección ubicada al oeste de San Pedro de Macoris, está caracterizada por extracciones limitadas y por una piezometría muy deprimida, con valores inferiores a 1 m s.n.m. hasta distancias de más de 20 km de la costa. La simulación del estado natural llevada pone de manifiesto que la intrusión salina afectaba probablemente a cotas superiores a -40 m s.n.m. hasta distancias de 20 km antes de que se operasen consistentes extracciones del acuífero. Se trata pues de una zona en la cual es posible extraer agua con características aptas para una utilización hidropotable sólo de cotas muy reducidas, con caudales limitados y a distancias consistentes de la costa. Se puede pues concluir que en dicha zona no es aconsejable programar incrementos futuros de las extracciones. La isopieza 1 m s.n.m. delinea en esta zona un área ya afectada por fenómenos de intrusión marina.

La sección ubicada al este de Santo Domingo, está caracterizada por extracciones elevadas en correspondencia de los campos pozos localizados al Noreste de la capital, y por una piezometría que conserva medianamente, no obstante las elevadas extracciones, valores superiores a 5 m s.n.m. hasta distancias de aproximadamente 20 km de la costa. La simulación del estado natural llevada a cabo pone en evidencia que la intrusión marina afectaba probablemente a cotas inferiores a -50 m s.n.m. a distancias del mar superiores a aproximadamente 14 km, antes de que comenzasen consistentes extracciones del acuífero.

La simulación de las extracciones en correspondencia de los campos pozos sugiere en las condiciones actuales el riesgo de atracción de aguas salobres por efecto de ‘upconing’ hacia los pozos de extracción.

Las simulaciones sugieren que un incremento del 50% de las extracciones actuales no sea sustentable, en cuanto determinaría la contaminación de los pozos con concentraciones superiores a las de potabilidad.

También la prosecución de la extracción con los ritmos actuales presenta riesgos en cuanto la posición actual de la interfase agua dulce-agua salobre parece corresponder a una condición transitoria. La evolución futura simulada sugiere que por efecto de ‘upconing’ hacia los pozos de extracción se puedan tener en el futuro problemas de salinización también con el ritmo actual de extracción.

Tanto los sectores costeros, como los que están lejos de la costa - se caracterizan por

valores piezométricos muy bajos y pueden ser por lo tanto afectados por fenómenos regionales de intrusión marina, se presenta en la Planicie Costera también otro fenómeno. Puede ser que pozos perforados a grandes distancias de la costa (hasta unos 10-15 km), en sectores de cota topográfica relativamente alta y cargas piezométricas por arriba de los 10÷20 m, resulten todavía afectados por fenómenos de salinización. Se trata generalmente de concentraciones de cloruros alrededor de valores máximos de 2000÷3000 ppm, críticos porque afectan a cualquier tipo de uso humano y también agrícola, pero sin embargo muy lejos de los 35000-37000 ppm típicos de las aguas saladas del mar Caribe (Walton, 1975). Los análisis químicos e isotópicos podrían ayudarnos a definir la edad de estas aguas e investigar por lo tanto el tema de eventuales recursos fósiles, que podrían aparecer sobre todo en presencia de depósitos finos limosos/arcillosos. Otra hipótesis también interesante es la de la existencia de horizontes de baja permeabilidad y altos niveles de contenido salino (ej. en otros sectores como la Loma de Sal y Yeso en el Valle de Neiba), en los cuales las aguas dulces podrían salinizarse de forma también muy rápida.

9.7.11 Recursos hídricos y reservas hídricas subterráneas

Se ha estimado, sobre la base de los datos de la recarga directa, un valor potencialmente utilizable del orden de los 1465*106 m3/a, con referencia al año promedio, valor que se reduciría a 920*106 m3/a para el año seco con tiempo de retorno de 10 años.

9.7.12 Régimen hidrológico y recursos hídricos superficiales

El sistema de las aguas superficiales, desde el río Nigua hasta el río Maimón, se caracteriza por (tab. 7.2.1./1):

- elevados valores de las escorrentías naturales promedio anuales, del orden de los $1860 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$;
- significativa variabilidad temporal:
 - con referencia a los ríos Nigua, Soco, Chavón y Duey, la escorrentía en años hidrológicamente secos constituye apenas el 55.7% (T=5 años) y el 44.2% (T=10 años) de la escorrentía promedio;
 - los valores mínimos de la escorrentía (Q_{365}) presentan un elevado campo de variabilidad, en particular en el sector oriental entre el río Soco y el río Anamuya, con certeza mayor que en las demás áreas de interés del estudio; sector donde se encuentran también los valores más altos (mayores de 0.50) del coeficiente de variación hiperanual;
- régimen hidrológico de tipo torrencial aunque sea permanente, con referencia a los cursos de agua que nacen de la Cordillera Central. En las zonas más bajas, caracterizadas por formaciones de caliza organógena, la contribución directa a la escorrentía superficial es bastante omisible, el retículo hidrográfico poco desarrollado, el régimen hidrológico local de tipo esporádico (por ej. ríos Brujuela y Cumayasa) y las aguas escurren en superficie sólo en correspondencia de episodios pluviométricos importantes, excepto el río Dulce, alimentado, aguas arriba de la ciudad de La Romana, por emergencias de aguas subterráneas;
- elevados valores del rendimiento promedio: la zona nordeste (ríos Maimón, Anamuya, donde se encuentra el máximo valor con referencia a las estaciones hidrométricas consideradas en el estudio, Duey-Yuma y Chavón) y la zona noroeste (ríos Higuero e Isabela, afluentes del río Ozama, y Haina), en coherencia con las características climáticas y litológicas de las áreas de captación.

Las características del régimen natural de las escorrentías arriba enumeradas ponen en evidencia cómo aun frente a valores promedio elevados, la efectiva capacidad de utilización en el tiempo del recurso hídrico está de hecho limitada, en particular en el sector oriental, por la significativa variabilidad hiperanual de las escorrentías mismas. La garantía de disponer en condiciones de relativa estabilidad temporal de recursos hídricos en cantidad significativa requeriría necesariamente la realización de obras de embalse-regulación, también de regulación plurianual aun de tamaño significativo (elevados valores de la evaporación, del orden de los 2000 - 2300 mm/a).

Por lo que atañe a la identificación de la entidad promedio mensual de la escorrentía torrencial y del flujo base, la contribución media del flujo base, relacionada con las características hidrogeológicas de las cuencas altas (litotipos que afloran de tipo fisurado), es, en términos generales, bastante modesta y alcanza desde un mínimo del 13% (río Anamuya) hasta un máximo alrededor del 45% (ríos Maimón y Haina), con valores alrededor del 30% en las cuencas de los ríos Ozama y Soco y del 24% en las cuencas de los ríos Chavón y Duey.

Para mayores detalles a los Anexos Memorias n° 13 y 17.

9.7.13 Identificación de zonas con regadío actual y potencialmente regables - Evaluación de las necesidades hídricas para el riego

Las actividades agronómicas y edafológicas efectuadas han permitido identificar las áreas con regadío actual y las potencialmente regables. Le attività agronomiche e pedologiche effettuate hanno permesso di identificare le aree con irrigazione attuale e quelle potenzialmente irrigabili.

Las áreas con regadío han sido ulteriormente subdivididas entre las regadas con aguas subterráneas, con aguas superficiales y con sistemas mixtos. Le aree irrigue sono state ulteriormente suddivise fra quelle irrigate con acque sotterranee, con acque superficiali e con sistemi misti.

Estas áreas han sido indicadas en la cartografía en escala 1:100.000. Queste aree sono state riportate nella cartografia in scala 1:100.000.

Se recuerda que el criterio utilizado para la delimitación de las áreas con regadío y de las potencialmente regables ha sido el de la predominancia, que considera, en el interior de un área cartografiable, el cultivo predominante; las áreas además han sido delimitadas al bruto de carreteras, viviendas, pequeñas áreas no cultivadas, etc. Si ricorda che il criterio utilizzato per la delimitazione delle aree irrigue e di quelle potenzialmente irrigabili è stato quello della prevalenza, che considera, all'interno di un'area cartografabile, la coltura prevalente; le aree inoltre sono state delimitate al lordo di strade, abitazioni, piccole aree non coltivate ecc.

En la Planicie Costera Oriental se han obtenido los siguientes datos:

<u>total superficie agrícola</u>	totale superficie agricola:	540.342	ha
<u>total áreas con regadíos</u>	totale aree irrigue:	14.492	ha
<u>total áreas con regadíos con aguas subterráneas</u>	totale aree irrigue con acque sotterranee:	1.578	ha
<u>total áreas con regadíos con aguas superficiales</u>	“ “ “ “ “ “ superficiali:	12.914	ha

En la Planicie Costera Oriental, las áreas con regadío están limitadas a modestas superficies; en el resto de la gran llanura, se encuentran numerosas extensiones de caña de azúcar sequiza, un tiempo en parte regadas con aguas subterráneas, pertenecientes a compañías privadas y estatales, para las cuales no se prevé en el próximo futuro un cambio de orden de cultivo.

A la caña se alternan vastas áreas destinadas al pasto bovino por la presencia de grandes haciendas ganaderas, a menudo de propiedad de las compañías productoras de azúcar.

Se trata de pastos naturales y artificiales situados en los terrenos menos indicados para la producción de la caña de azúcar y destinados al pasto permanente.

Se trata de todos modos de superficies agrícolas que no están incluidas en las estadísticas del INDRHI.

Mezclados con estas superficies están presentes núcleos más o menos extensos, predominantemente huertos, plantados para el sustento de los campesinos que viven en los numerosos Batey diseminados en las distintas haciendas.

En el conjunto, las áreas susceptibles al riego suman 327.093 ha.

De éstas, sin embargo, sólo 11.765 ha pertenecen a la segunda clase de susceptibilidad y por lo tanto presentan limitaciones no excesivamente fuertes, de la restante superficie, 311.887 ha pertenecen a la tercera clase y 3.441 a la cuarta y presentan por lo tanto fuertes limitaciones para la irrigación.

Por lo que concierne en fin a las necesidades hídricas de los principales cultivos encontrados en la Planicie Costera Oriental, la demanda neta anual por hectárea asume un valor promedio de 474 mm, oscilando desde un mínimo de 222 hasta un máximo de 973 mm anuales. Per quanto riguarda infine le necessità idriche delle principali colture riscontrate nella Valle de Neiba, la domanda netta annua per ettaro assume un valore medio di 905 mm, oscillando da un minimo di 323 a un massimo di 1484 mm annui.

9.7.14 Utilización de las aguas subterráneas

A nivel regional los consumos estimados de aguas subterráneas resultarían ser de entidad limitada si se los comparase con el recurso natural utilizable, aun tratándose del área más importante por presión demográfica, actividades industriales, comerciales y turísticas.

Sin embargo el cuadro aparentemente confortante resulta ser extremadamente complejo en escala local evidenciando criticidades tanto con referencia a la cantidad de recurso disponible, como, más a menudo, a la calidad del recurso mismo.

En tal sentido, el área al noreste del Distrito Nacional con sus campos de pozos (Mata Mamón, Los Marenos, El Naranjo, La Catalina y La Joya) presenta un nivel de explotación del orden de los 90*106 m³/a, igual a casi el 50% del recurso utilizable con referencia al año promedio.

Por lo que concierne a los aspectos cualitativos se debe sin embargo recordar que los fenómenos de intrusión marina están difundidos y son extremadamente críticos a lo largo de toda la franja costera como así también en correspondencia de las áreas de extracción significativa para fines potables, como en el caso de la ciudad de Santo Domingo y de San Pedro de Macorís.

9.7.15 Utilización de las aguas superficiales

El nivel de explotación de las aguas superficiales es bastante modesto en sentido relativo hacia otras áreas del País (véanse Tab. 7.1.11./1, 7.2.2./1-2).

En efecto las características del régimen natural de las escorrentías ponen en evidencia cómo aun frente a valores promedio elevados, del orden de los $1860 \cdot 10^6$ m³/a, la efectiva capacidad de utilización en el tiempo del recurso hídrico es de hecho limitada, en particular en el sector oriental, por la significativa variabilidad hiperanual de las escorrentías mismas, tanto anuales promedio como mínimas diarias promedio. La garantía de disponer en condiciones de relativa estabilidad temporal de recursos hídricos en cantidad significativa requeriría necesariamente la realización de obras de embalse-regulación, también de regulación plurianual, de tamaño significativo.

A tal propósito, se recuerda que aproximadamente el 54% de los recursos hídricos superficiales actualmente empleado por la CAASD para el abastecimiento urbano del área de Santo Domingo procede de la cuenca exterior del río Nizao-embalse de Valdesia (Planicie de Baní).

La zona más afectada por las utilizaciones del recurso hídrico superficial es la occidental, ríos Haina y Ozama, en particular:

- cuenca del río Haina: utilización para riego: caudal de operación promedio 0.79 m³/s, máximo 1.8 m³/s; utilización para aprovechamiento urbano (aguas potables): caudal de explotación alrededor de los 4.8 m³/s, CAASD y INAPA;

- cuenca del río Ozama: utilización para riego: caudal de operación promedio 1.46 m³/s (canales Capita Yabacao y Yabacao); utilización para aprovechamiento urbano (aguas potables): caudal de explotación 0.30 m³/s (CAASD) con previsión de ulteriores captaciones por aproximadamente 3.00 m³/s (CAASD).

En el sector de la Planicie Costera Oriental comprendido entre el río Higuamo y el río Anamuya, tanto por las características del régimen de las escorrentías superficiales, como por las vigentes prácticas agrícolas (agricultura predominantemente de tipo secano), la utilización del recurso hídrico superficial es exclusivamente para aprovechamiento urbano, alrededor de los 1.1 m³/s.

Por último, el sector comprendido entre el río Maimón-Yonú y el río Nisibón está afectado por utilizaciones del recurso hídrico para fines de riego. Sin embargo, del cotejo entre los valores estimados de la hidroexigencia bruta para riego, alrededor de los $72 \cdot 10^6$ m³/a (sector Maimón-Yonú) y de los $34 \cdot 10^6$ m³/a (sector Nisibón), del caudal promedio de operación de los sistemas de riego, alrededor de los $15.8 \cdot 10^6$ m³/a (sector Maimón-Yonú) y de los $4.1 \cdot 10^6$ m³/a (sector Nisibón) y de las escorrentías naturales disponibles (río Mamón), emergen posibles situaciones críticas ligadas tanto al desequilibrio entre caudales promedio de operación e hidroexigencia bruta, como a la entidad del recurso hídrico potencialmente utilizable.

De todas maneras, se individualizan dos sub-áreas específicas, cuenca del río Haina y el sector comprendido entre los ríos Maimón.- Yonú y Nisibón, que presentan niveles de utilización elevados, indicativamente superiores aun al 50% de la escorrentía promedio natural anual; situación representativa de un nivel de utilización del recurso tendenciosamente crítico, con elevada probabilidad de operar en condiciones de sequía socio-económica.

Para mayores detalles, refiérase al Anexo Memorias n° 17.

9.7.16 Cantidades explotables de agua

El análisis del balance hídrico del área ha evidenciado que el nivel de explotación de las aguas superficiales es bastante modesto en sentido relativo hacia otras áreas del País. En efecto las características del régimen natural de las escorrentías ponen en evidencia cómo aun frente a valores promedio elevados, del orden de los $1860 \cdot 10^6$ m³/a, la efectiva capacidad de utilización en el tiempo del recurso hídrico es de hecho limitada, en particular en el sector oriental, por la significativa variabilidad hiperanual de las escorrentías mismas, tanto anuales promedio como mínimas diarias promedio. La garantía de disponer en condiciones de relativa estabilidad temporal de recursos hídricos en cantidad significativa requeriría necesariamente la realización de obras de embalse-regulación, también de regulación plurianual, de tamaño significativo. A tal propósito, se recuerda que aproximadamente el 54% de los recursos hídricos superficiales actualmente empleado por la CAASD para el abastecimiento del área de Santo Domingo procede de la cuenca exterior del río Nizao-embalse de Valdesia (Planicie de Baní). Por lo que atañe a los recursos hídricos superficiales se individualizan de todas maneras dos sub-áreas específicas, cuenca del río Haina y el sector comprendido entre los ríos Maimón.- Yonú y Nisibón, que presentan niveles de utilización elevados, indicativamente superiores aun al 50% de la escorrentía promedio natural anual; situación representativa de un nivel de utilización del recurso tendenciosamente crítico, con elevada probabilidad de operar en condiciones de sequía socio-económica.

Por lo que concierne a los recursos hídricos subterráneos, se ha estimado, sobre la base de los datos de la recarga directa, un valor potencialmente utilizable del orden de los $1465 \cdot 10^6$ m³/a, con referencia al año promedio, valor que se reduciría a $920 \cdot 10^6$ m³/a para el año seco con tiempo de retorno de 10 años. A nivel regional los consumos estimados de aguas subterráneas resultarían ser de entidad limitada si se los comparase con el recurso natural utilizable, aun tratándose del área más importante por presión demográfica, actividades industriales, comerciales y turísticas. Sin embargo el cuadro aparentemente confortante resulta ser extremadamente complejo en escala local evidenciando criticidades tanto con referencia a la cantidad de recurso disponible, como, más a menudo, a la calidad del recurso mismo. En tal sentido, el área al noreste del Distrito Nacional con sus campos de pozos (Mata Mamón, Los Marenos, El Naranjo, La Catalina y La Joya) presenta un nivel de explotación del orden de los $90 \cdot 10^6$ m³/a, igual a casi el 50% del recurso utilizable con referencia al año promedio. Por lo que concierne a los aspectos cualitativos, que quedan fuera sensu stricto del presente análisis, se debe sin embargo recordar que los fenómenos de intrusión marina están difundidos y son extremadamente críticos a lo largo de toda la franja costera como así también en correspondencia de las áreas de extracción significativa para fines potables, como en el caso de la ciudad de Santo Domingo y de San Pedro de Macorís.

9.8 Recomendaciones

El cierre del proyecto concluyó la fase preparatoria de la puesta en marcha de un control sistemático de los recursos hídricos subterráneos de las seis áreas consideradas. A la luz de los resultados obtenidos, es evidente la necesidad de llevar a cabo actividades de monitoreo en el futuro que impliquen las obtención de los máximos resultados con el mínimo esfuerzo. La red operativa aun basándose en el esqueleto constituido por la utilizada en el curso del proyecto, deberá ser optimizada tanto por lo que se refiere a la frecuencia y a los parámetros controlados como en su distribución areal.

La relativa constancia del quimismo evidenciada por los muestreos sucesivos permite prever, salvo el registro de datos anómalos, un muestreo semestral, en función de las dos estaciones que caracterizan la climatología tropical de la Isla La Española; en particular se considera ideal efectuar los muestreos al comienzo de la estación húmeda y de la seca.

Naturalmente, en el caso en que en uno o más puntos se relevasen empeoramientos significativos de los parámetros controlados, se deberá planificar un monitoreo con mayor frecuencia, a fin de mantener el control del fenómeno en acto.

Se aconseja tener bajo control todos los parámetros que fueron objeto de las campañas de monitoreo en el curso del proyecto, y analizar los resultados sobre la base de los límites de potabilidad. Lo que a primera vista podría parecer un exceso de rigidez, en realidad responde a las exigencias socio-económicas del país. La presencia de muchos centros poblados menores y de instalaciones rurales, autónomos para el abastecimiento hidropotable, requiere la selección de las condiciones más conservadoras. Esta elección naturalmente no impide que se evalúe la posibilidad de utilización del recurso también para otros fines menos calificados.

Las características de selección de los puntos de la red propuesta fueron definidos teniendo en cuenta las siguientes indicaciones:

1. Para los puntos inventariados en el curso del proyecto e incluidos en la red utilizada:

indicaciones dadas por el monitoreo;

características de los pozos (perforados, excavados, tipo de acuífero captado, presencia de un equipo de bombeo);

distribución areal.

2. Para los puntos inventariados en el curso del proyecto, pero no incluidos en la red utilizada:

distribución areal, a fin de integrar, donde sea necesario, la red utilizada;

características de los pozos (perforados, excavados, tipo de acuífero captado, presencia de un equipo de bombeo).

Los 122 en la Planicie Costera Oriental, están en el mapa de la red de control de calidad y de la intrusión marina (Mapa 3).

En la eventualidad de que los puntos indicados en el Mapa 3 no fueren disponibles en el futuro, ellos deberán ser sustituidos con otros circundantes, que respondan a los criterios arriba enumerados.

Para realizar una red adecuada al control areal del fenómeno de intrusión marina, sería necesario efectuar perforaciones a lo largo de direcciones ortogonales a la piezometría,

que disten 20 km entre sí. En la red propuesta aquí se consideró la mayor parte de los pozos ya utilizados. El orden de magnitud de la profundidad a alcanzar está dado por la estimación indicada por el cociente de Ghybern-Herzberg, en la cual se define una proporción de aproximadamente 1:40 entre la cota piezométrica sobre el nivel del mar y la profundidad de la interfase agua dulce-agua salada.

Naturalmente, en el curso de la perforación será necesario efectuar logs verticales de salinidad que permitan adecuar el objetivo de la perforación al caso específico. En línea de máxima las perforaciones deberán superar la profundidad de -50 m sobre el nivel del mar.

La distancia y el número de pozos a efectuar a lo largo de cada perfil deberá ser función de los resultados obtenidos, tomando la precaución de proceder en las perforaciones desde el mar hacia el interior. De todas maneras, el número no deberá ser inferior a tres.

Las zonas caracterizadas por extracciones intensas requerirán tanto la disminución de la distancia entre los perfiles, como su localización respecto al centro de las depresiones piezométricas existentes.

La red deberá ser tenida bajo control con una cadencia semestral, de tal manera se podrán entrecruzar los datos relevados con logs verticales de salinidad, con aquéllos relativos al contenido de cloruros relevados a partir de la red de control de la calidad de las aguas subterráneas. Naturalmente, para los cloruros deberán tomarse en consideración los pozos ubicados en las primeras dos zonas.

La ubicación de los perfiles sugeridos está ilustrada en el mapa 3. La estimación efectuada sobre la base de los datos actualmente disponibles indica la necesidad de perforar nuevos pozos en las siguientes áreas: La Joya, Mata Mamón, Los Marenos, S. Pedro de Macoris, La Romana.

Para afinar la interpretación isotópicas, en general, sería necesario disponer de:

- Una red de muestreo de las precipitaciones que pueda cubrir de manera homogénea el área (en dirección Norte-Sur y Este – Oeste). Una red concebida de esta manera permitiría tanto una evaluación del gradiente isotópico en relación con la cota, como la individualización de masas húmedas con diferente procedencia y composición.

- Una red de monitoreo geoquímico e isotópico de las aguas superficiales que pueda describir los procesos hidrológicos e hidrodinámicos que tienen lugar bajo diferentes condiciones (pérdidas por evaporación de lagos u otras cuencas, acuíferos drenados o drenantes, competición con las mareas en las zonas de laguna o de estuario).

Sólo con la comparación los isótopos y la geoquímica pueden dar explicaciones y pueden ser aprovechados para una correcta elaboración de los modelos de los sistemas.

Con respecto a las aguas minero-medicinales analizadas, se aconseja una evaluación más detallada de las mismas para verificar la posibilidad de un adecuado aprovechamiento. A tal fin deberán llevarse a cabo las siguientes actividades:

- identificación del origen y de las potencialidades de la napa a través de las siguientes investigaciones:
 1. estudio geológico e hidrogeológico de detalle, encuadrado en el ámbito regional;
 2. balance hidrológico de los sistemas y evaluación cuantitativa de los recursos y de las reservas;
 3. pormenorizados monitoreos hidroquímicos, microbiológicos e isotópicos en las distintas fases hidrológicas del año;

- evaluación económica de la inversión y, en caso de resultado positivo, ejecución de las investigaciones ulteriores:
 4. monitoreo, con frecuencia por lo menos estacional, de: caudal, quimismo, contenido micróbico;
 5. eventuales estudios farmacológicos y clínicos de detalle, experimentales también ;
 6. ejecución del proyecto de la obra de toma;

. A seguito della evaluación de la calidad potable de las aguas subterráneas, el cotejo con los términos normativos tanto de la ley nacional vigente (NORDOM 64) como con lo prescrito por la OMS en la emanación de 1993 y por la Directiva CEE n°778 de 1980, ha puesto de manifiesto una cierta inadecuadez de algunos de los límites fijados por la norma nacional, que han resultado tan restrictivos, como injustificados, que una aplicación rigurosa habría determinado un juicio final negativo casi para la mayoría de las aguas consideradas

En tal sentido se sugiere al legislador una revisión por lo menos de los límites negativos relacionados con la dureza total (fijar un límite a 100 mg/l cuanto ésta o no está reglamentada [CEE] o es por lo menos 5 veces más alta [500 – OMS], significa prohibir por exceso de dureza también el uso de aguas consideradas por lo común poco duras) y a los sólidos disueltos, que resultan ser respectivamente la mitad y un tercio de los límites de OMS y CEE

Siempre en tema de aguas potables, con respecto a su protección, la falta de una referencia nacional en la definición de las acciones a emprender para la protección de las captaciones de aguas potables, no ha permitido, en el ámbito del proyecto, definir ni la geometría ni la gradación de las franjas de respeto de los pozos además de las tipologías de actividades a prohibir en el interior de las mismas.

En tal sentido resulta indispensable que la misma República Dominicana, sobre la base de las experiencias de los demás países, se dote de un propio instrumento normativo que sea apropiado, y realísticamente aplicable, a las peculiaridades del país mismo.

En términos generales, podríamos sugerir un método para afrontar el problema que respete las siguientes líneas guía en la delimitación de zonas en las cuales se respetan vínculos para la protección de las aguas subterráneas:

Área de protección directa. Debe referirse únicamente a la obra de captación y deben impedirse las infiltraciones desde la superficie, delimitando una zona a impermeabilizar con arcilla que debe extenderse sobre una lámina de polietileno. El terreno que rodea al pozo debería protegerse ulteriormente con una cobertura de cemento.

Área de protección territorial Debería referirse a la zona ubicada alrededor de las captaciones en la cual se prohíbe o se reglamenta cualquier actividad potencialmente contaminadora. La protección territorial podría realizarse considerando tres franjas distintas:

Franja A – Área de prohibición total de cualquier actividad, salvo cultivos de pradera o bosque, siempre y cuando no se utilicen abonos, pesticidas, herbicidas, etc.

Franja B – Deben estar prohibidas las actividades susceptibles de alteración de las modalidades de flujo y alimentación natural de las aguas subterráneas. Las actividades en el interior de esta franja deben garantizar que no haya contaminación bacteriana, que las sustancias no biodegradables no puedan llegar hasta las aguas subterráneas, que aquéllas biodegradables no constituyan una carga biológica suplementaria (ej. consumo de oxígeno). Por último, debe quedar tiempo suficiente, en caso de contaminación, para realizar una obra de saneamiento. En esta zona no deberían realizarse construcciones

desagües, canales, ni deberían esparcirse en el terreno sustancias químicas como fertilizantes, antiparasitarios, etc.

Franja C – Deben estar reglamentadas y controladas las actividades potencialmente contaminadoras, limitando el número de instalaciones y operando de manera que haya una dilución suficiente de las aguas subterráneas antes que la contaminación llegue hasta los pozos.

La delimitación de dichas áreas podrá definirse adoptando un criterio a elegirse entre el geométrico, el temporal y el hidrogeológico, remarcando de todos modos dos principios que deberían inspirar la zonación:

- La ejecución de las nuevas captaciones deber estar subordinada a la posibilidad de establecer las franjas de respeto.
- En territorios ya urbanizados, la funcionalidad de las franjas puede mostrar una eficacia limitada; en tal caso deberían potenciarse los sistemas de control preventivo de la calidad de las aguas subterráneas.

A fin de aumentar la eficiencia regadía y limitar las pérdidas de agua, sería oportuno tener en mayor consideración las propiedades limitantes de los suelos, a través de un mejor uso de los mismos, dado que a menudo los cultivos no resultan estar adecuadamente distribuidos en relación con las condiciones de los suelos, del clima y de la disponibilidad de agua, con graves repercusiones sobre la reditabilidad.

Por ejemplo, en los terrenos de textura pesada, caracterizados por alta retención de humedad y drenaje imperfecto, con escasa o ausente pedregosidad, podrían incentivarse los cultivos de radicación superficial, como papa (usando variedades adecuadas como la red pontiac), batata, maíz, frijoles, plátano, berenjena, maní.

Con sencillas prácticas agronómicas, como nivelados, siembras en surcos, necesarios aportes de potasio y fósforo y la construcción de drenajes para evitar estancamientos de agua, con una dotación de agua basada estrictamente en la demanda de estos cultivos, se obtendrían elevados rendimientos unitarios y aumento de la eficiencia del riego.

Donde las limitaciones principales están constituidas por escasa profundidad, topografía ondulada, alta tendencia a la erosión, abundante pedregosidad y fertilidad natural baja, los cultivos deberían limitarse a tipologías como aguacate y cítricos, que implican pocas labores de cultivo, pero requieren oportunas prácticas de conservación del suelo, como la construcción de barreras para evitar la erosión, el enterramiento de los residuos orgánicos y el uso de sistemas de riego por aspersión, a fin de aumentar la eficacia de riego y evitar la erosión del suelo, además que los necesarios aportes de fertilizantes de corrección o de fondo, para garantizar un buen resultado de las cosechas.

Los resultados de las actividades de modelización de las aguas subterráneas de acuerdo con las observaciones generales, sugieren:

- Limitar los niveles de explotación, sobre todo en proximidad a la costa;
- Limitar al máximo posible las explotaciones en profundidad. Considerando las elevadas transmisividades y los impactos muy bajos sobre la piezometría privilegiar la solución "más pozos a baja profundidad y caudales reducidos en vez de pocos pozos profundos y caudales elevados";
- Limitar en cualquier caso, la concentración de pozos y privilegiar, donde sea posible, la ubicación a lo largo de una línea paralela a la costa;
- Donde se encuentran condiciones de alimentación desde los trechos no salinizados de los ríos, privilegiar la ubicación de los campos pozos relativamente próximos a los mismos. Por lo contrario, ubicarse los más lejos posible de los trechos finales sujetos a fenómenos de salinización incluso lejos de la costa.

Con referencia a los problemas de intrusión marina, es necesario monitorear adecuadamente la posición de la interfase agua salobre - agua dulce en la zona al noreste de Santo Domingo de manera tal de mejorar el estado actual de los conocimientos y seguir la evolución del fenómeno en el futuro. Se sugiere llevar a cabo el monitoreo mediante la ejecución de perfiles periódicos de salinidad en pozos perforados para este propósito y completados como integración de la red de control de la intrusión marina existente. Los pozos tendrán que estar ubicados posiblemente a lo largo de un alineamiento perpendicular a las isolíneas de la piezometría observada y tendrán que alcanzar profundidades adecuadas para interceptar a la interfase agua dulce-agua salobre. Se puede estimar que la profundidad de los pozos tendrá que ser tal que permita el monitoreo de la concentración salina a cotas de por lo menos $-160 \div -170$ m s.n.m. a distancias de aproximadamente 18 km del mar.

Por lo que se refiere a las actividades en el ámbito de la climatología, de la hidrología y del manejo de los recursos hídricos superficiales, a la luz de los resultados conseguidos y para garantizar la posibilidad de un control sistemático tanto de la oferta como de la utilización de los recursos hídricos como ayuda para un manejo sostenible y eficaz de los mismos, se recomienda:

- climatología:

- la instalación de por lo menos tres nuevas estaciones en particular en las cuencas medianas de los ríos Ozama y Soco y en la provincia de Altagracia entre Bávaro y Cabo San Rafael, a fin de integrar y completar la red meteorológica instalada en el curso del proyecto, para garantizar tanto un mejor control de las áreas afectadas por particulares condiciones climáticas, como la disponibilidad, en el futuro, de datos climáticos fiables y representativos a favor de la utilización del modelo matemático lluvia-escorrentía suministrado en el ámbito del proyecto;
- mantener eficiente la actual red meteorológica (estaciones instaladas en el curso del proyecto, actuales redes INDRHI y ONAMET), rindiendo disponible de esta manera, para el futuro control meteorológico, una red moderna suficientemente amplia y articulada en el territorio de interés, integrada con las estaciones climáticas sugeridas aquí arriba;

- hidrología:

se sugiere la activación de la red hidrométrica de control como hemos indicado en el Anexo memorias n° 13 y presentado en el Mapa n° 2, red constituida por estaciones hidrométricas, para garantizar un control en base diaria de los principales cursos de agua, y por secciones de aforo en las cuales efectuar mediciones de caudal con cadencia mensual en los ríos menores y sobre todo en los principales canales para riego. Por lo que atañe a los canales de riego, se recuerda que el conocimiento de la entidad de los recursos efectivamente tomados es fundamental para evaluar correctamente tanto el actual nivel de solicitación del régimen fluvial, como el efecto, en particular sobre las escorrentías de estiaje (equilibrio ecológico), de menores tomas consiguientes a mejoramientos de la actual eficiencia de los sistemas de riego.

- manejo de los recursos hídricos:

Teniendo en cuenta el actual nivel de utilización, tendenciosamente crítico, de los ríos Haina y Yonú-Maimón y de los programas de utilidades futuras de las aguas del río Ozama, se sugiere:

- la reconstrucción de las series históricas de las escorrentías naturales (por lo menos 10-15 años) mediante el modelo matemático lluvia-escorrentía suministrado en el ámbito del

proyecto;

- evaluar oportunas modalidades operativas para mejorar la eficiencia de los sistemas de riego tanto para reducir el riesgo de situaciones de sequía socio-económica (insatisfacción de los usuarios) aun en años moderadamente secos en sentido hidrológico, tanto para garantizar, liberando recursos actualmente ocupados, condiciones de escorrentía en el cauce (flujo base, caudales de estiaje) compatibles con los equilibrios ambientales de los sistemas fluviales mismos. En un segundo momento será posible hipotetizar, también con la ayuda de los modelos de simulación suministrados, la posibilidad y sostenibilidad de ulteriores utilizations disipadoras, en particular agrícolas;

- evaluar, también sobre la base de consideraciones de tipo biológico, la entidad del caudal ecológico en los cauces de los ríos, se recuerda que el caudal ecológico definido sólo sobre la base de criterios hidrológicos representa de todas maneras un umbral mínimo que debe ser garantizado al ecosistema fluvial;

- definir alternativas sostenibles de manejo, en particular en condiciones de sequía tanto en sentido climático como en sentido socio-económico, también mediante la aplicación, en escala de cuenca (en particular para los ríos Haina y Ozama), del código de balance WEAP suministrado en el ámbito del proyecto, también para evaluar el impacto de diferentes escenarios de uso en términos de costos-beneficios, previa integración y complemento de la información necesaria, en particular sobre el trend temporal de las tomas, la eficiencia de riego y el nivel de contaminación de las aguas, actualmente no suficiente.

Se recuerda que a fin de garantizar una utilización sostenible de los recursos hídricos, la actividad de planificación debe referirse necesariamente al entero sistema cuenca, tanto en sentido hidrológico como hidrogeológico, según un método “supply-demand oriented”.

FIGURAS

TABLAS