

COMPOSIZIONE DELLE ROCCE E QUALITÀ DELLE ACQUE NELL'AREA DI SAN PEDRO SULA (HONDURAS)

ROCK COMPOSITION AND WATER QUALITY OF SAN PEDRO SULA AREA (HONDURAS)

RAFFAELE MADONNA^(*), PATRIZIO TORRESE^(*), GIANCARLO CREMA^(**),
PATRIZIO SIGNANINI^(*) & VINCENZO COSTANTINO^(***)

^(*) Università "G. D'Annunzio" di Chieti-Pescara - DiGAT - Dipartimento di Geotecnologie per l'Ambiente e il Territorio - Via dei Vestini 30 - 66013 Chieti Scalo, Italia

^(**) Università "G. D'Annunzio" di Chieti, Facoltà di Scienze MM.FF.NN. - Via dei Vestini 30 - 66013 Chieti Scalo, Italia

^(***) C. Lotti & Associati - Consulting Engineering, - Via del Fiume, 14 - 00186 Roma, Italia

RIASSUNTO

È stato realizzato uno studio a carattere multidisciplinare, "Estudio Para La Proteccion Ambiental Del Acuifero Del Valle De Sula Y De Las Fuentes De Agua De La Reserva Forestal Del Merendon", focalizzato alla valutazione e gestione delle risorse idriche nell'area di San Pedro Sula (Honduras).

Nel presente lavoro viene messa in luce la relazione tra la composizione delle rocce del bacino di alimentazione e la qualità delle acque e dei terreni alluvionali sede dell'acquifero. L'acquifero è contenuto entro i sedimenti alluvionali della Piana di San Pedro Sula; tali sedimenti, nelle zone di contatto con la catena montuosa del Merendon, sono costituiti principalmente da conoidi di deiezione generate dal trasporto di materiale da parte dei fiumi; la zona apicale di tali conoidi è caratterizzata da elevata permeabilità ed è sede di un acquifero monostrato libero. Spostandosi verso le zone più distali delle conoidi, compaiono zone depresse a sedimentazione molto fine (limi e argille); la permeabilità dei sedimenti è molto bassa e l'acquifero si sdoppia in uno più superficiale ed un più profondo; quest'ultimo è risultato essere in debole pressione. Per quanto riguarda il bacino di alimentazione, rappresentato dalla catena montuosa del Merendon, esso comprende rocce a diverso grado di metamorfismo, rocce intrusive, prodotti d'anatessi e prodotti di idrotermalismo caratterizzate da permeabilità per fratturazione.

Il dilavamento delle rocce e della coltre pedogenetica dei bacini d'alimentazione ha determinato la qualità dell'acqua, dei suoli e dei paleosuoli delle successive deposizioni dei sedimenti alluvionali. Acque di tipo bicarbonato alcalino con conducibilità elettrica specifica inferiore ai $100 \mu\text{S cm}^{-1}$ sono legate a rocce intrusive ed a prodotti d'anatessi del Rio Zapotal con breve percorso idrico sotterraneo. Acque di tipo bicarbonato-calcico con conducibilità elettrica specifica superiore a $1000 \mu\text{S cm}^{-1}$ osservate ad Aldea El Carmen sono da collegarsi alla calcite secondaria derivata dagli scisti carbonatici inseriti tra i plutoni granitici. Le acque di circolazione profonda, talora calde, sono di tipo bicarbonato-alcalino con pH elevati fino a 10. Acque a pH acido, intorno a 4, di tipo solfato-clorurato-alcalino si osservano nel bacino del Rio Manchaguala e sono da collegarsi a ione SO_4^{2-} generatosi per ossidazione di Solfuri metalli formati al bordo del plutone, con la roccia incassante, per idrotermalismo.

In pianura le acque superficiali subiscono un pesante inquinamento

ABSTRACT

A multidisciplinary study was carried out, within the "Estudio Para La Proteccion Ambiental Del Acuifero Del Valle De Sula Y De Las Fuentes De Agua De La Reserva Forestal Del Merendon" plan, focused on the appraisal and management of the water resources in San Pedro Sula area (Honduras).

This paper deals with the hydrochemical study which is of great significance for the comprehension of the hydrogeological system. The aim is to highlight the relationship between the rock composition of the ground water recharge basin and the quality of the alluvial terrain aquifer.

The aquifer is contained between alluvial sediments of the San Pedro Sula plain; these sediments, in the areas in contact with the Merendon mountain chain, comprise mainly alluvial fans generated by material transported by the rivers; the apical area of these fans is characterised by high permeability and is the site of a free monostrate aquifer. Moving towards the more distal fan areas, depressed areas of fine sedimentation (silt and clay) appear; the permeability of the sediments is very low and the aquifer divides into a more superficial one and a deeper one; the latter was found to be under slight pressure. Regarding the ground water recharge basin, represented by the Merendon mountain chain, this includes rocks in various degrees of metamorphism, intrusive rocks, anatectic products and hydrothermal products characterised by permeability through fracturing.

The rocks of the ground water recharge basin and the scour of the pedogenetic layer have determined the present water quality and the soils and palaeosoils composition of the later alluvial sediment deposition. Bicarbonate-alkaline waters characterised by a specific electric conductivity $<100 \mu\text{S cm}^{-1}$ are linked to intrusive rocks and anatectic products of the Zapotal river. These waters have a short underground watercourse. Calcium bicarbonate waters with specific electric conductivity $>1000 \mu\text{S cm}^{-1}$, observed in Aldea El Carmen area, are connected to the dissolution of secondary calcite. This calcite is considered being the product of precipitation from carbonatic schists involved in granitic pluton intrusions. Deep alkaline-bicarbonate waters, warm in some cases, have a pH of 10. Sulphate-chlorine-alkaline waters with pH around 4, occurs in the Manchaguala river basin, and are linked to sulphates produced by oxidation of metallic

mento soprattutto organico, legato agli scarichi civili ed industriali dell'agroindustria.

PAROLE CHIAVE: *Geochimica, idrogeologia, composizione delle rocce, acquifero*

INTRODUZIONE

Tra le varie metodologie utilizzate nella prospezione idrogeologica, lo studio del chimismo delle acque sotterranee e superficiali rappresenta un metodo molto rapido che consente di caratterizzare il bacino di ricarica delle acque sotterranee, di individuare le zone di alimentazione e di drenaggio preferenziali, di risalire alle temperature profonde e di paragonare o correlare tra loro le varie tipologie di acque (CELICO, 1993). La litologia, l'intensa pedogenesi, l'assetto strutturale dei bacini di ricarica delle acque sotterranee e del substrato, l'evoluzione paleogeografica e sedimentologica, i circuiti sotterranei condizionano in maniera determinante la qualità delle acque di falda. Tali acque, siano esse superficiali che profonde, possono successivamente subire un pesante inquinamento da parte di centri di pericolo come scarichi industriali, civili e pastorizia. Diventa quindi importante valutare la vulnerabilità delle singole aree ed eventualmente, nota la distribuzione areale dei centri di pericolo, il rischio potenziale di inquinamento della falda.

Il presente lavoro, che si colloca all'interno di uno studio idrogeologico multidisciplinare che ha interessato l'acquifero alluvionale di San Pedro Sula (Honduras), intende portare un contributo alla pianificazione territoriale e alla gestione delle risorse idriche della regione.

INQUADRAMENTO GEOLOGICO, GEOMORFOLOGICO E STRUTTURALE DELL'AREA

L'area oggetto del presente studio, circoscritta in Fig. 1, è situata nella parte NW dell'Honduras e comprende la catena Montuosa del Merendon ad W e la pianura alluvionale di San Pedro Sula ad E caratterizzata dalla presenza di numerosi sorgenti e corsi d'acqua.

Come si può osservare dalla Fig.2, la geologia dell'area è molto complessa ed articolata. In particolare la litologia del bacino di ricarica delle acque sotterranee, rappresentato dalla Montagna del Merendon, comprende rocce metamorfiche e rocce intrusive. Le rocce metamorfiche paleozoiche affiorano, con il nome di "Scisti di Corogua", nella zona del Merendon ed in alcuni affioramenti nella valle del Chamalecon (FOYE, 1918; WILLIAMS & MCBIRNEY, 1969; ELVIR, 1974, 1976; HORNE *et alii*, 1976; FINCH, 1981, 1986; DONNELLY *et alii*, 1991; MILLS RICHARD, 1991; PIERCE HERBERT & RIVERA MONTES, 1991). Si distinguono rocce ascrivibili a tre gradi di metamorfismo:

- metamorfismo basso: scisti verdi e scisti clorito-sericitici;
- metamorfismo medio: micascisti quarzosi talora con feldspato ad Epidoto, con livelli di anfiboliti ad Orneblenda, Andesina, Tremolite;
- metamorfismo alto: ortogneiss.

Le formazioni metamorfiche paleozoiche sono interessate da intrusioni di graniti, granodioriti, dioriti di varia età. Le rocce intru-

sulphurs formed at the margin of the pluton by hydrothermal processes.

KEYWORDS: *Geochemistry, hydrogeology, rock composition, aquifer*

INTRODUCTION

Of the various methodologies used in hydrogeological prospecting, the most rapid is the chemical study of groundwater and surface water. It allows characterisation of the ground water recharge basin, pinpointing of preferential recharge and drainage areas, arriving at deep temperatures and comparison or correlation between the various water types (CELICO, 1993). Lithology, intense pedogenetic processes, ground water recharge basin and subsurface structure, palaeographic and sedimentological evolution and underground circuits have been determining factors affecting water table quality. These waters, whether superficial or deep, may subsequently undergo heavy pollution from highly dangerous areas such as industrial, urban and stock-rearing wastes. Therefore, it is important to evaluate the vulnerability of individual areas and if necessary, given the known area distribution of the centres of the risk areas, the potential risk of pollution of the aquifer.

This work is carried out in the context of a multi-disciplinary hydrogeological study concerning the San Pedro Sula (Honduras) alluvial quifer and and intends to give a contribution to territorial planification and management of hydric resources of the region.

THE GEOLOGICAL, GEOMORPHOLOGIC AND STRUCTURAL CHARACTERISTICS OF THE AREA

The area concerned in this study, outlined in Fig. 1, is located in the north-west part of Honduras and includes the Merendon mountain to the W chain and the San Pedro Sula alluvial plain to the E, the later being characterised by the presence of numerous water courses.

As seen in Fig. 2, the area is characterised by a very complex and varied geology. In particular, the lithology of the ground water recharge basin, represented by the Merendon Mountain, includes metamorphic and intrusive rocks. Palaeozoic metamorphic rocks appear, under the name of "Schists of Corogua", in the Merendon area and in some outcrops in the Chamalecon valley (FOYE, 1918; WILLIAMS & MCBIRNEY, 1969; ELVIR, 1974, 1976; HORNE *et alii*, 1976; FINCH, 1981, 1986; DONNELLY *et alii*, 1991; MILLS RICHARD, 1991; PIERCE HERBERT & RIVERA MONTES, 1991). Three degrees of metamorphism can be identified:

- low grade metamorphism: green schists and chlorite-sericitic schists;
- medium grade metamorphism: quartzose mica-schists often with Epidote feldspar, with hornblende, andesine, tremolite amphibolite levels;
- high grade metamorphism: orthogneiss.

Palaeozoic metamorphic formations are affected by granite, granodiorite and diorite intrusions of various ages. The oldest

ROCK COMPOSITION AND WATER QUALITY OF SAN PEDRO SULA AREA (HONDURAS)

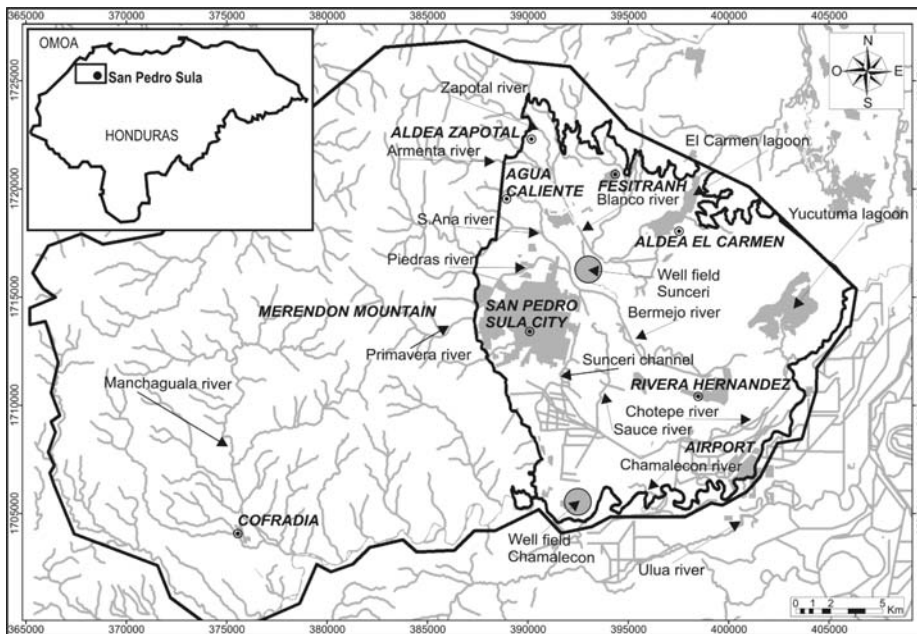


Fig. 1 - Ubicazione dell'area di studio
 - Localization of the studied area

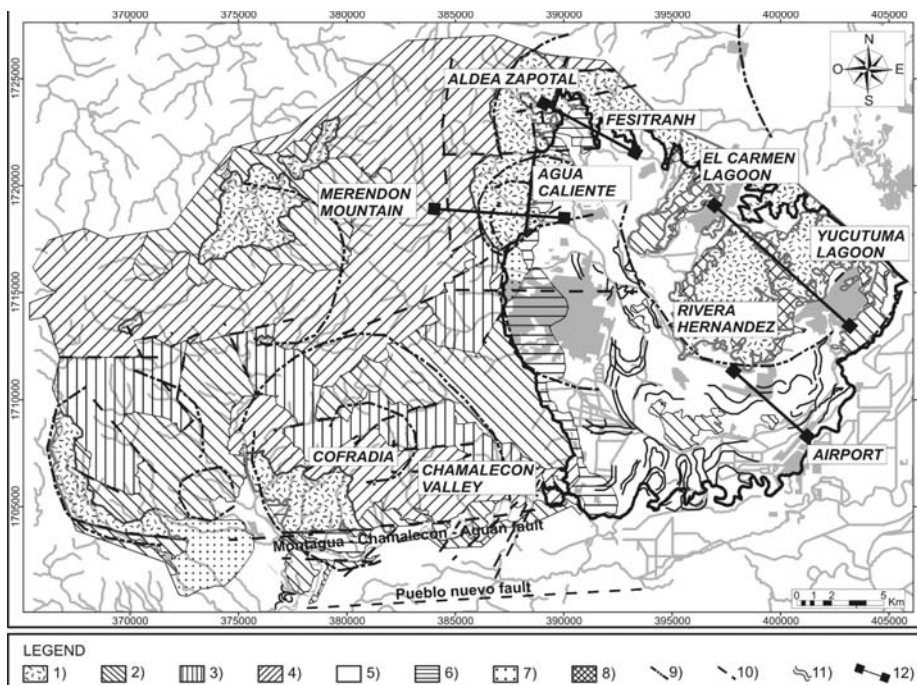


Fig. 2 - Schema geologico-geomorfologico. 1) Rocce intrusive; 2) Rocce metamorfiche (basso grado); 3) Rocce metamorfiche (medio grado); 4) Rocce metamorfiche (alto grado); 5) Alluvioni; 6) Depositi di conoide; 7) Conoidi di flusso; 8) Depositi di talus; 9) Fratture circolari; 10) Faglie; 11) Meandri; 12) Tracce delle sezioni idrogeologiche
 - Geological and geomorphological scheme. 1) Intrusive rocks; 2) Metamorphics rocks (low grade); 3) Metamorphics rocks (medium grade); 4) metamorphics rocks (high grade); 5) Alluvium; 6) Conoid deposits; 7) Flow conoid deposits; 8) Talus deposits; 9) Circular fractures; 10) Faults; 11) Buried riverbeds; 12) Traces of hydrogeological sections

sive più antiche affiorano circa 15 chilometri più a W di San Pedro Sula, e presentano composizione adamellitica. Rocce intrusive meno antiche sono costituite da granodioriti passanti a tonaliti, affioranti ad E di Cofradia. L'intrusione plutonica più grande è rappresentata dal batolite di San Pedro Sula (nell'area occidentale di San Pedro Sula), affiorante nelle aree di Agua Caliente, Aldea Zapotal, Fesitranh, El Carmen, Yucutuma, Rivera Hernandez, costituito da granodioriti con numerosi filoni acidi e basici orientati W-E. Nella zona compresa tra la Laguna El Carmen e la Laguna Yucutuma, si sono osservate numerose fratture riempite da calcite secondaria da connettere a lembi residuali di facies metamorfiche carbonatiche rimasti inglobati tra i vari plutoni.

Nell'area occidentale, zona di alimentazione dell'acquifero, al bordo dei plutoni, compaiono aureole di contatto dove l'intenso idrotermalismo ha permesso la formazione di diverse facies mineralogiche, tra cui frequenti sono i solfuri metallici.

L'erosione, lo smantellamento di tali rocce ed il loro trasporto da parte dei fiumi ha prodotto numerose conoidi alluvionali che si trovano ubicate al contatto tra la catena montuosa del Merendon e la pianura alluvionale; quest'ultima si presenta depressa nella zona orientale e centrale dove compaiono estese lagune. I fiumi, a regime torrentizio nella parte montana, assumono l'andamento meandriforme nella piana e scorrono all'interno di estesi depositi terrazzati. I sedimenti alluvionali sono stati infine sottoposti ad una pedogenesi che si è estesa su tutta l'area e in modo variabile in funzione della quota.

Dal punto di vista dell'evoluzione geologica, in epoca cretacea l'area di San Pedro Sula era sommersa; testimonianza di ciò sono le formazioni marine mesozoiche affioranti immediatamente a S di San Pedro Sula. Alla fine del Cretacico Superiore la parte più a N della faglia Pueblo Nuevo si è sollevata assieme alla zona di San Pedro Sula. Sull'area, prossima al mare, si impostava una paleomorfologia con lo smantellamento del complesso mesozoico che ricopriva il metamorfico paleozoico. Nello stesso tempo, od in epoca immediatamente successiva, si cominciava a formare la catena dell'Omoa; contemporaneamente o subito dopo questi eventi, forse in relazione alla trascorrenza E-W Montagua-Chamalecon-Aguan (HORNE *et alii*, 1976; LOTTI & ASSOCIATI, 2002; SIGNANINI *et alii*, 2002), si formava per pull-apart una depressione che comprenderebbe l'attuale depressione dell'Ulua e quella di San Pedro Sula che, a scala locale, risulta essere un graben orientato NNE-SSW. Nel terziario, all'incrocio dei lineamenti tettonici orientati NE-SW con gli W-E ed altri ad andamento NW-SE, si sono estrusi i paleoalti granodioritici-dioritici che hanno sollevato la parte orientale dell'area di studio. Un'ulteriore intrusione si è prodotta in tempi più recenti nell'area dello Zapotal con messa in posto di un batolite granitico-granodioritico (FOYE, 1918; WILLIAMS & MCBIRNEY, 1969; ELVIR, 1974, 1976; HORNE *et alii*, 1976; FINCH, 1981, 1986; DONNELLY *et alii*, 1991; MILLS RICHARD, 1991; PIERCE HERBERT & RIVERA MONTES, 1991; C. LOTTI & ASSOCIATI, 2002; SIGNANINI & GASPARRI, 2002).

intrusive rocks emerge around 15 kilometres west of San Pedro Sula and are adamellitic in composition; the more recent ones are composed of granodiorites passing to tonalites, appearing east of Cofradia. The largest plutonic intrusion is the batholite at San Pedro Sula (in the western zone of San Pedro Sula), outcropping in the Agua Caliente, Aldea Zapotal, Fesitranh, El Carmen, Yucutuma and Rivera Hernandez areas, comprising granodiorites with numerous W-E oriented acid and basic seams. In the area between El Carmen lagoon and Yucutuma lagoon, numerous fractures, filled with secondary calcite, were observed, to be connected to residual limbs of carbonate metamorphic facies that have been incorporated between the various plutons. To the west, which is the recharge area of the aquifer, near at the edge of the plutons, contact aureoles are observed where intense hydrothermalism has caused the formation of several mineralogical facies, the most frequent being metallic sulphurs.

Erosion, dismantling of these rocks and their transportation by rivers has produced numerous alluvial fans located at the contact-point between the Merendon mountain chain and the alluvial plain; the latter is depressed to the east and central areas where wide lagoons appear. The rivers, torrential in the mountain area, tend to be meandering in the plain and run inside wide terraced deposits. Finally, in the entire area the alluvial sediments have been subjected to a pedogenetic process to varying degrees, according to the altitude.

With regard to geological-structural evolution, the San Pedro Sula area was submerged during the Cretaceous period; evidence of this can be seen in the outcrops of Mesozoic marine formations immediately south of San Pedro Sula. At the end of the Upper Cretaceous period, the furthest northern part of the Pueblo Nuevo fault was raised up together with the San Pedro Sula area. The dismantling of the Mesozoic complex, which covered the Palaeozoic metamorphic formations, superimposed a palaeomorphology on the area, near the sea. At the same time, or in the immediate following period, the formation of the Omoa chain began; simultaneously with or immediately after these events, possibly related to the Montagua-Chamalecon-Aguan EW strike slip (HORNE *et alii*, 1976; LOTTI & ASSOCIATI, 2002; SIGNANINI *et alii*, 2002), pull-apart forces were responsible of the formation of a depression, which probably includes the present Ulua depression and the San Pedro Sula depression; on a local scale, it is a NNE-SSW oriented graben. In the Tertiary period, at the intersection of NE-SW oriented tectonic lines with the W-E ones and others with a NW-SE orientation, granodioritic-dioritic horsts were extruded, raising the eastern part of the area under investigation. A further intrusion came about more recently in the Zapotal area with the settlement of a granitic-granodioritic batholite (FOYE, 1918; WILLIAMS & MCBIRNEY, 1969; ELVIR, 1974, 1976; HORNE *et alii*, 1976; FINCH, 1981, 1986; DONNELLY *et alii*, 1991; MILLS RICHARD, 1991; PIERCE HERBERT & RIVERA MONTES, 1991; C. LOTTI & ASSOCIATI, 2002; SIGNANINI & GASPARRI, 2002).

IL SISTEMA ACQUIFERO

La tettonica attiva, il regime torrentizio, le forti ed immediate variazioni di portata dei fiumi, le frequenti divagazioni del talweg e l'intensa pedogenesi hanno contribuito a creare, in periodi successivi e quindi a diverse quote, un sistema acquifero fortemente anisotropo; significative sono infatti le variazioni laterali e verticali di facies, con presenza di paleosuoli a diverse profondità. Tale sistema acquifero è caratterizzato da due tipi di circolazione, una profonda con risposta dilazionata rispetto alle precipitazioni e l'altra meno profonda con risposta immediata (SIGNANINI & GASPARRI, 2002; TORRESE *et alii*, 2006).

Nella Fig. 3 sono riportati le direzioni di circolazione delle acque sotterranee (3b) e la sezione idrogeologica schematica dell'acquifero (Fig. 3c). (NORPLAN, 1986a; 1986b; 1987; 1990; HAASE *et alii*, 1993a, 1993b; HAASE *et alii*, 1994; PACIFIC CONSULTANTS, 1994a; 1994b; 1994c; MCKENZIE, 1995).

THE AQUIFER SYSTEM

The active tectonics, the torrential regimen, strong and immediate variations in river flow rates, frequent digressions of the talweg and intense pedogenetic processes have contributed to creating in subsequent periods and therefore at various altitudes, a strongly anisotropic aquifer system; the lateral and vertical variations of facies, with palaeosoils at various depths, are significant. This aquifer system has two types of circulation, a deeper circulation that has deferred response with respect to the precipitations and a shallower circulation, characterised by a more immediate response (SIGNANINI & GASPARRI, 2002; TORRESE *et alii*, 2006).

Figure 3 shows the circulation directions of groundwaters (Fig. 3b) and the schematic hydrogeological section of the aquifer (Fig. 3c). (NORPLAN, 1986a; 1986b; 1987; 1990; HAASE *et alii*, 1993a, 1993b; HAASE *et alii*, 1994; PACIFIC CONSULTANTS, 1994a; 1994b; 1994c; MCKENZIE, 1995).

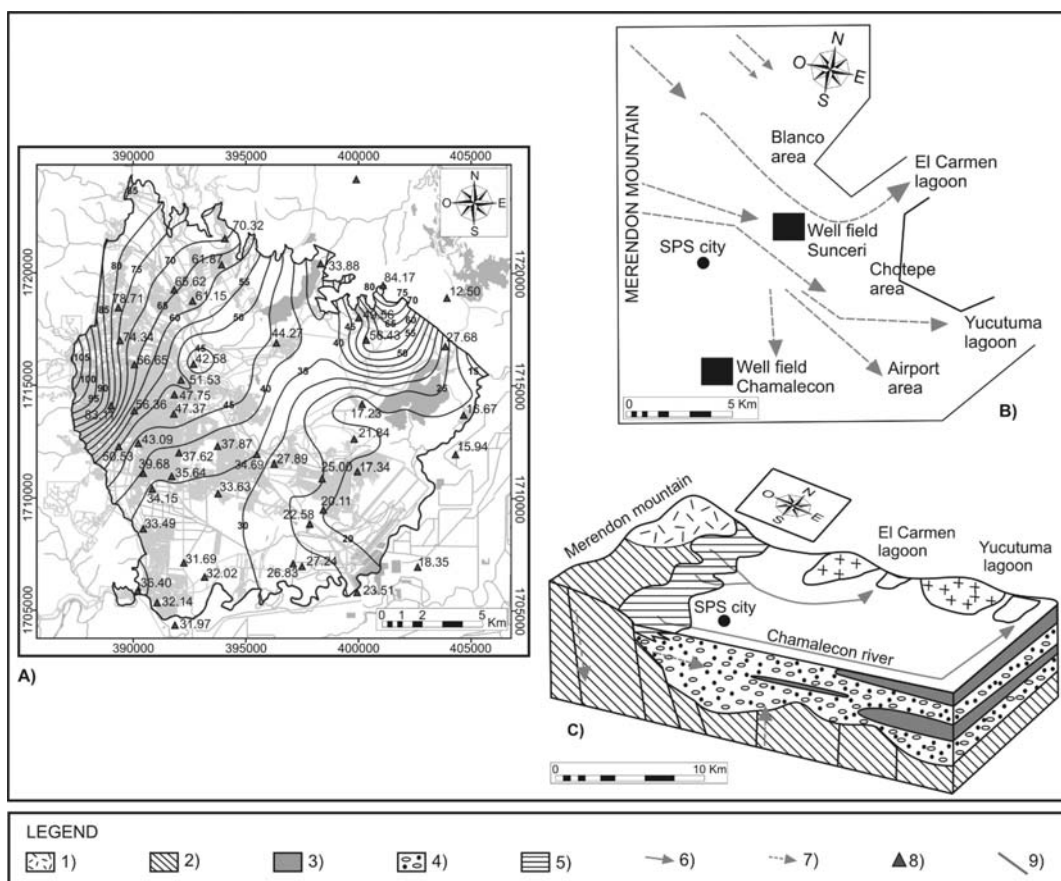


Fig. 3 - a) Piezometria di gennaio 2002 (5 m); b) Ricostruzione schematica dei flussi idrici sotterranei; c) Acque superficiali e sotterranee, sezione idrogeologica schematica. 1) Rocce intrusive; 2) Rocce metamorfiche; 3) Paleosuoli; 4) Alluvioni; 5) Depositi di conoide; 6) Acque superficiali; 7) Acque sotterranee; 8) Punti di monitoraggio della piezometria (m s.l.m.); 9) Fiumi
 - a) Observed piezometric heads of January 2002 (5 m); 3b) Groundwater flows schematic map; 3c) Superficial water and groundwater, schematic hydrogeological section. 1) Intrusive rocks; 2) Metamorphic rocks; 3) Paleosoils; 4) Alluvium; 5) Fan deposits; 6) Superficial water; 7) Groundwater; 8) Water table observations (m a.s.l.), 9) Rivers

Il sistema acquifero è stato assimilato ad un monostrato freatico anche se presenta tali caratteristiche solo nella zona di alimentazione identificabile nella parte apicale e mediana delle conoidi; in zona distale, per la presenza di un livello argilloso di separazione, l'acquifero si sdoppia in uno meno profondo freatico ed uno più profondo in pressione (Fig. 3c). Per quanto riguarda la piezometria, sulla rete di pozzi scelti, per quanto possibile, privi d'interferenze di pompaggi nelle prossimità, sono state effettuate 10 misure piezometriche nel periodo compreso tra gennaio 2002 e giugno 2004. Come è possibile osservare nella carta della piezometria di gennaio 2002 (Fig. 3a), le direzioni di flusso sono molto articolate ed inoltre vengono evidenziate due zone di alimentazione del sistema acquifero, una posta a NW e l'altra ad W dell'area in studio (TORRESE *et alii*, 2006).

Nella Fig. 3b viene proposta una ricostruzione schematica dei flussi idrici sotterranei. Il bacino di ricarica delle acque sotterranee, rappresentato dalla montagna del Merendon, sembra alimentare in parte l'area del Rio Blanco-Laguna El Carmen con flussi idrici provenienti principalmente da NW, in parte l'area di Sunceri con flussi idrici provenienti da W; tale flusso vira verso Rio Chotepe differenziandosi più a S in due flussi uno verso il Chamalecon e l'altro verso l'Aeroporto; da qui vira verso NE, verso la Laguna Yucutuma che potrebbe rappresentare, assieme alla Laguna El Carmen, una zona di soglia ed un ulteriore recapito del sistema acquifero (Fig. 4). Le indagini geofisiche effettuate in queste ultime due aree infatti hanno evidenziato una netta risalita del bedrock. (CHARRUTHERS, 1983; SIGNANINI & GASPARRI, 2002).

The aquifer system has been assimilated to a phreatic monostrate even though it has these characteristics only in the recharge area identified in the apical and median part of the fans. In the distal area, the presence of an argillaceous separation level causes the aquifer to split into two different aquifers, a shallower, phreatic one and a deeper one which is under pressure. (Fig. 3c). With regard to the piezometry, on the network of wells chosen, as far as possible without pumping in their vicinity, 10 piezometric measurements were carried out in the period between January 2002 and June 2004. As we can see from the piezometric map of January 2002 (Fig. 3a), there are several directions of flow and two recharge areas for the water system are shown, one to the NW and the other W of the area under investigation (TORRESE *et alii*, 2006).

In Fig. 3b, a schematic reconstruction of the groundwater flows is shown. The ground water recharge basin located to the west, represented by the Merendon mountain, seems to be partly feeding the Rio Blanco-Laguna El Carmen area, with water flowing mainly from the NW, and partly the Sunceri area with water flowing from the W; this flow turns towards Chotepe river separating further sud into two flows, one towards the Chamalecon zone and the other towards the Airport area; from here it turns north-west towards the Yucutuma lagoon, which might be, along with the El Carmen lagoon, a further discharge for the aquifer system (Fig. 4); geophysical studies carried out by us have shown a clear bedrock horsts (CHARRUTHERS, 1983; SIGNANINI & GASPARRI, 2002).

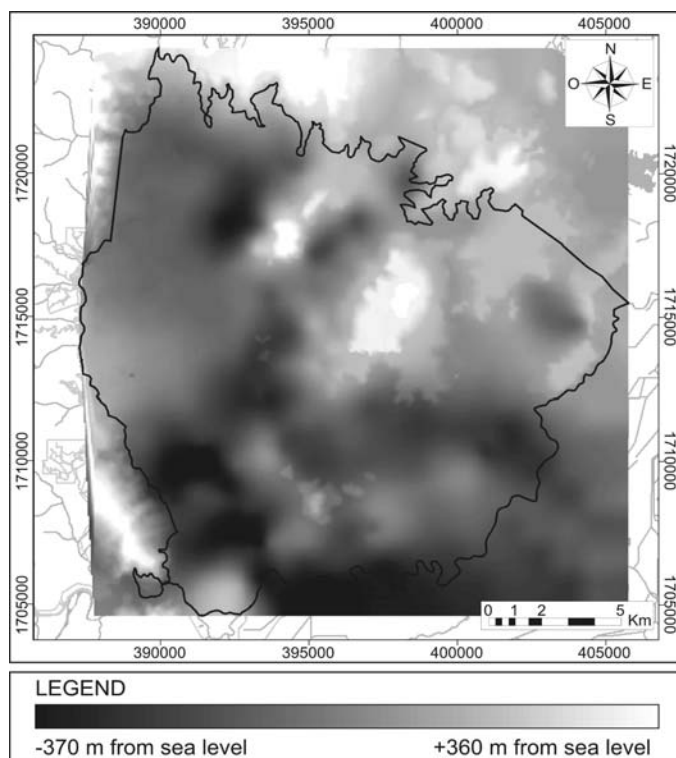


Fig. 4 - Carta della profondità del substrato
- Map of the aquifer bedrock elevation

IDROCHIMICA DELLE ACQUE

Lo scopo dell'analisi chimica delle acque sotterranee e superficiali è stato quello di definirne le caratteristiche, dovute a cause naturali, e quindi collegare il chimismo con la geologia (litologia, assetto strutturale, ecc.) e l'idrologia. Successivamente l'ubicazione e la caratterizzazione delle sorgenti inquinanti, correlate con le caratteristiche di permeabilità della zona non satura e con la soggiacenza della falda, ha permesso di fornire indicazioni sulla vulnerabilità dell'acquifero.

ACQUE SOTTERRANEE

Il tipo chimico dell'acqua sotterranea dipende da:

- litologia dei bacini di alimentazione dell'acquifero;
- processi di intensa pedogenesi delle rocce con formazione di potenti suoli in cui si ha mobilizzazione degli elementi chimici con processi redox, solubilizzazione e precipitazione;
- evoluzione sedimentologica dei terreni che costituiscono l'acquifero della pianura con relative mutazioni ambientali e quindi diverse condizioni fisico-chimiche;
- circuiti idrici sotterranei più o meno profondi con variazione del tempo e della superficie di contatto tra il fluido ed il mezzo poroso e/o fratturato e variazione della capacità di solubilizzazione strettamente legata alle variazioni di temperatura con la profondità e alle concentrazioni di saturazione.

Nella Fig. 5, vengono sintetizzati, i dati caratterizzanti i 4 principali tipi chimici di acqua riscontrati nella zona di studio e nella tabella 1 i loro valori di Conducibilità elettrica specifica e pH.

CHEMICAL TYPE	pH	E.C. (µS/cm)	LOCALITY
(type 1) Sodium or Potassium bicarbonate	7.2	50	Aldea Zapotal
(type 2) Sodium or Potassium bicarbonate	10.0	2000	Agua Caliente
(type 3) Calcium bicarbonate	6.9	1000	Aldea El Carmen
(type 4) Sulfate and Chloride	4.0	3000	Rio Manchaguala

Tab. 1 - Principali tipi chimici di acque nell'area di San Pedro Sula (Honduras)
- *Principal chemical types of water in the San Pedro Sula area (Honduras)*

Fig. 5 - Diagramma di Langelier-Ludwig. 1) Acqua di tipo chimico 1, bicarbonato sodio-potassica, (acqua emergente nell'area di Aldea Zapotal); 2) Acqua di tipo chimico 2, bicarbonato sodio-potassica (pH=10), (acqua emergente nell'area di Agua Caliente); 3) Acqua di tipo chimico 3, bicarbonato calcica, (acqua emergente nell'area di Aldea El Carmen); 4) Acqua di tipo chimico 4, cloruro-solfatica, (acqua emergente nell'area del Manchaguala)
- *Langelier-Ludwig diagram. 1) Sodium or Potassium bicarbonate-type 1 chemical water spring, (rising water in the Aldea Zapotal area); 2) Sodium or Potassium bicarbonate-type 2 chemical water spring (pH=10), (rising water in the Agua Caliente area); 3) Calcium bicarbonate-type 3 chemical water spring, (rising water in the Aldea El Carmen area); 4) Sulfate and Chloride-type 4 chemical water spring, (rising water in the Manchaguala area)*

WATER HYDROCHEMISTRY

The aim of the groundwater and surface water chemical analyses was to define the characteristics of the waters, under a natural point of view, and to connect the chemistry with the geology (lithology, structure, etc.) and the hydrology. At a later stage, the location and the characteristic features of the polluting sources, connected to the permeability features of the unsaturated zone and to the water table, enabled the production of information relative to the vulnerability of the aquifer.

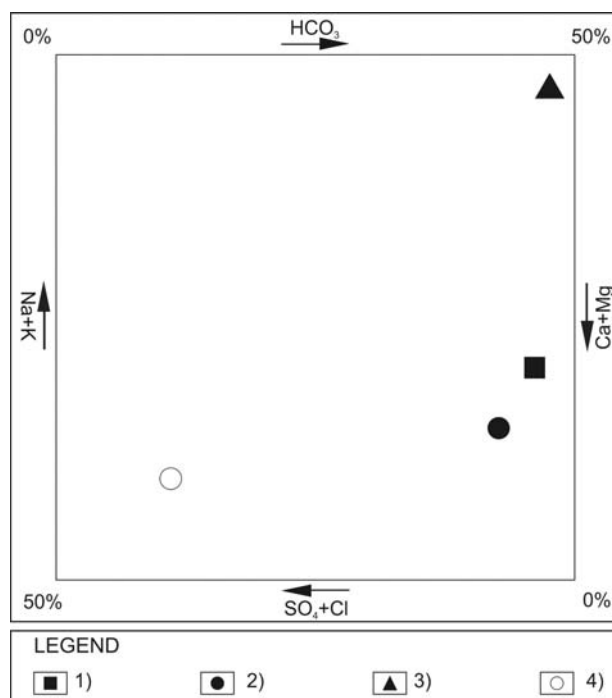
GROUNDWATERS

The chemical type of the groundwater depends on:

- lithology of the aquifer ground water recharge basins;
- intense pedogenetic rock processes with formation of powerful soils in which there is mobilisation of chemical elements with redox processes, solubilisation and precipitation;
- sedimentological evolution of the terrains comprising the alluvial plain's aquifer with relative environmental mutations and therefore different physical-chemical conditions;
- groundwaters circuits at varying depths with variation in time and contact surfaces between the liquid and the porous and/or fractured medium and variation in solubilisation capacity, closely linked to temperature variations according to depth and saturation levels.

Data referring to the four chemical water types found in the area under investigation are summarised in Fig. 5 and their specific electric conductivity values and pH are shown in Table 1.

Figure 6 shows the specific Electric Conductivity chart for the



Nella Fig. 6 è riportata la carta della Conducibilità Elettrica specifica dell'acqua in cui è evidente l'aumento di conducibilità passando dalla zona di alimentazione (NW e W) verso SE ed E; sono inoltre evidenti i valori elevati di C.E. sia tra Laguna El Carmen e Laguna Yucutuma, sia a Chamalecon; i primi legati alla dissoluzione della calcite presente nelle fratture, i secondi alla presenza di facies carbonatiche.

Nel profilo Aldea Zapotal-Fesitranh, orientato NW-SE (Fig. 7) viene schematizzata l'emergenza dell'acqua di tipo 1; tale acqua, bicarbonato alcalino, circola all'interno di rocce a composizione granodioritica caratterizzate da intensa fratturazione; il tempo di contatto acqua-roccia è breve, la solubilità è scarsa e ciò giustifica i bassi valori di conducibilità elettrica specifica riscontrati (50 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

Nel profilo di Fig. 8, orientato W-E, trasversale al bordo del graben ed ubicato in corrispondenza di "Agua Caliente", sita a NW di San Pedro Sula, viene schematizzata la ricostruzione di un possibile circuit-

water, in which we observe an increase in conductivity, moving from the recharge area (NW and W) towards SE and E; we also observe high E.C. values both between the El Carmen lagoon and the Yucutuma lagoon and at Chamalecon area; the former are linked to the solution of calcite in the fractures, and the later, to the presence of Mesozoic carbonatic facies to the S.

In the Aldea Zapotal-Fesitranh profile, oriented NW-SE (Fig. 7) the emergence of type 1 water are shown; this alkaline bicarbonate water circulates inside granodioritic rocks characterised by intense fracturing; the water-rock contact time is short and solubility is low, justifying the low values found for specific electric conductivity (50 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

In the Fig. 8 profile, oriented W-E, transverse to the edge of the graben and located at "Agua Caliente", situated north-west of San Pedro Sula, the deep hydraulic circuit can be observed (EPPLER *et alii*, 1986; ENEE, 1988; PATINO, 1993); l'acqua, the type 2 water,

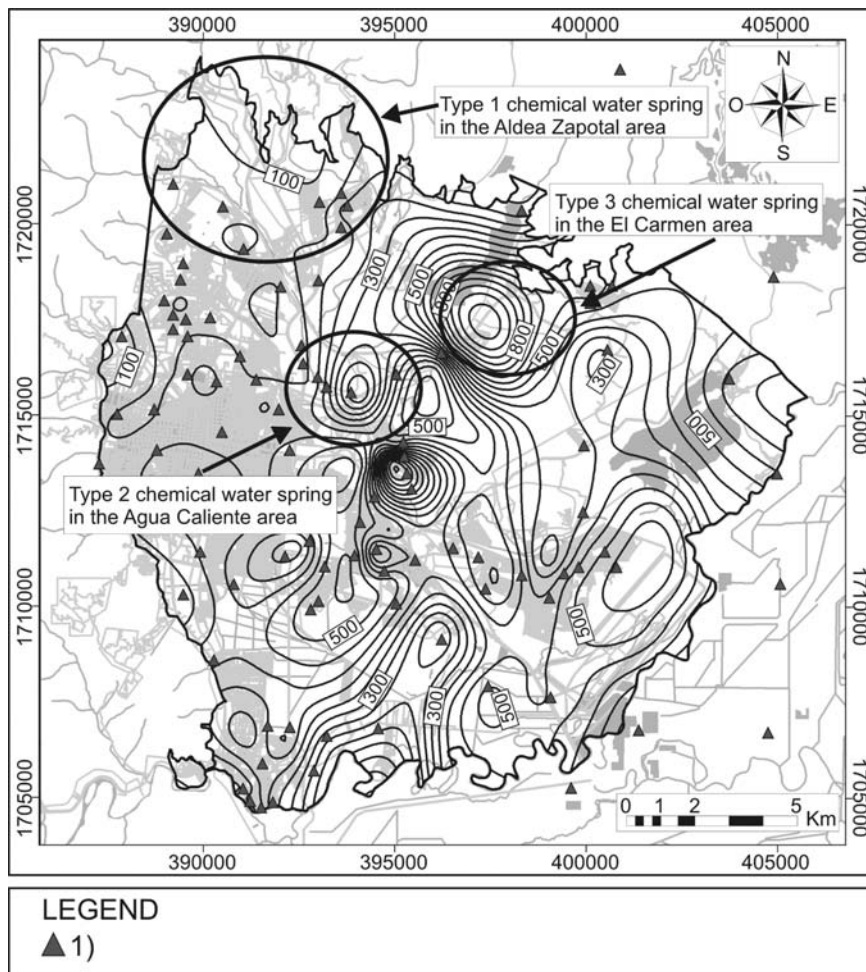


Fig. 6 - Carta della Conducibilità Elettrica specifica.
 1) Punti di monitoraggio della Conducibilità Elettrica specifica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
 - Specific Electric Conductivity map. 1) E.C. observations points ($\mu\text{S}/\text{cm}$)

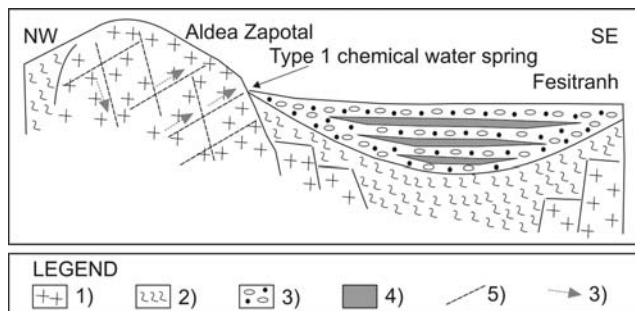


Fig. 7 - Sezione idrogeologica schematica Aldea Zapotal - Fesitranh. 1) Rocce intrusive; 2) Rocce metamorfiche; 3) Alluvioni; 4) Paleosuoli; 5) Faglia; 6) Acque sotterranee
 - Schematic hydrogeological cross section Aldea Zapotal - Fesitranh. 1) Intrusive rocks; 2) Metamorphic rocks; 3) Alluvium; 4) Paleosoils; 5) Fault; 6) Groundwater

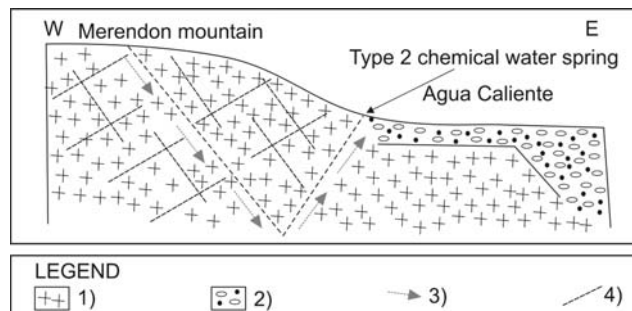


Fig. 8 - Sezione idrogeologica schematica Montagna del Merendon - Agua Caliente. 1) Rocce intrusive; 2) Alluvioni; 3) Acque sotterranee; 4) Faglia
 - Schematic hydrogeological cross section Merendon mountain - Agua Caliente. 1) Intrusive rocks; 2) Alluvium; 3) Groundwater; 4) Fault

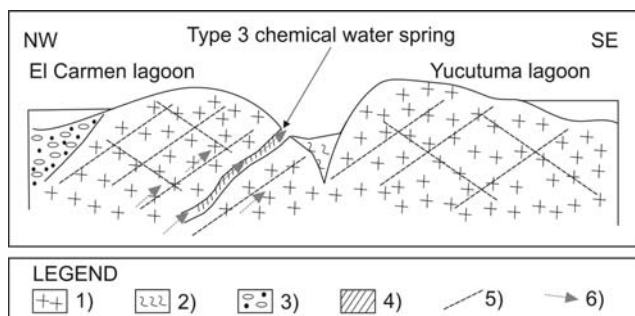


Fig. 9 - Sezione idrogeologica schematica Laguna El Carmen - Laguna Yucutuma. 1) Rocce intrusive; 2) Rocce metamorfiche; 3) Alluvioni; 4) Depositi di calcite secondaria; 5) Faglia
 - Schematic hydrogeological cross section El Carmen lagoon - Yucutuma lagoon. 1) Intrusive rocks; 2) Metamorphic rocks; 3) Alluvium; 4) Secondary calcite deposits; 5) Fault; 6) Groundwater

to idrico profondo (EPPLER *et alii*, 1986; ENEE, 1988; PATINO, 1993); l'acqua, di tipo 2, che emerge in pressione, presenta una temperatura che supera i 50°C ed una C.E. di 2000 µS/cm; l'elevato potere solvente di questa acqua è infatti legato alla elevata temperatura ed al lungo percorso sotterraneo. L'aumento in Na è responsabile del pH pari a 10.

Nel profilo NW-SE (Fig. 9) tra Laguna El Carmen e Laguna Yucutuma, sono schematizzati i lembi residuali di copertura costituiti da scisti carbonatici inseriti tra i plutoni granitici e le fratture; l'elevata circolazione idrica di soluzioni sature di $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ ha permesso il riempimento di tali fratture con calcite secondaria. I pozzi perforati in tali aree presentano acque bicarbonato-calciche (tipo chimico 3) ad elevata conducibilità elettrica (1000 µS/cm) (DIMA & MONCADA, 1994; DIMA *et alii*, 1994; GROSS, 1994; HIDRO SISTEMAS, 1998; POMPER, 1999).

ACQUE SUPERFICIALI

La qualità delle acque superficiali dipende da cause naturali, tipo di rocce dei bacini di alimentazione e sedimenti della pianura, ma soprattutto da cause antropiche legate a centri di pericolo di tipo civile, industriale ed agricolo. Le sezioni di monitoraggio sono state scelte in base alla gerarchizzazione del reticolo fluviale e in base all'ubicazione degli scarichi industriali e civili (Fig. 10). Alcune industrie scaricano nel sistema fognante sanitario, altre direttamente nei rii con o senza trattamenti. (HAASE *et alii*, 1993a,

emerging under pressure, has a temperature of above 50°C and an E.C. of 2000 µS/cm; the high solvent power of this water is in fact linked to the high temperature and to the long underground circuit. The increase of Na is responsible for the pH of 10.

The residual covering limbs comprising carbonatic schists pinched between the granitic plutons and the fractures can be seen in the NW-SE profile (Fig. 9) between the El Carmen lagoon and the Yucutuma lagoon; the abundant water circulation of saturated $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ has been responsible for filling these fractures with secondary calcite. The wells that have been exploited in these areas have bicarbonate-calcic waters (chemical type 3) with high electric conductivity (1000 µS/cm) (DIMA & MONCADA, 1994; DIMA *et alii*, 1994; GROSS, 1994; HIDRO SISTEMAS, 1998; POMPER, 1999).

SURFACE WATER

Surface water quality depends on natural causes, rock types in the ground water recharge basins and sediments on the alluvial plain, but above all, it depends on anthropic causes linked to urban, industrial and agricultural centers of risk. The sections monitored were chosen on the basis of the river grid hierarchization and on the basis of the location of industrial and urban waste discharges (Fig. 10). Some industries discharge directly into the sanitary drainage system, and others directly into the streams with or without treatment (HAASE *et alii*,

1993b; HAZEN & SAWYER, 1994; ESA, 1994; VARGAS, 1994; EXPERCO INTERNATIONAL, 1994; FONDO ARGENTINO DE COOPERACION, 2000; SIGNANINI & GASPARRI, 2002). Sono state eseguite due campagne di misure, una in periodo di magra ed una in periodo di morbida. La portata è stata misurata in campo contemporaneamente al prelievo del campione chimico e alla misura di parametri chimico-fisici. I parametri presi in considerazione ed analizzati in laboratorio sono stati:

- Temperatura, pH, Conducibilità Elettrica specifica, Torbidità;
- Na⁺, K⁺, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, SO₄⁻, Cl⁻, HCO₃⁻;
- Fe, Mn, Cr, Cu, Cd, Pb, Zn;
- N_{organico}, N-NH₄⁺, N-NO₂⁻, N-NO₃⁻;
- P_{totale}, P-PO₄³⁻;
- Solidi Disciolti Totali, Solidi totali, Solidi Sospesi, Solidi Sedimentabili;
- DBO₅, DCO, O₂ disciolto;
- Coliformi fecali, Coliformi totali

Il parametro conducibilità elettrica specifica, correlato con la portata, è stato da noi scelto come parametro indicativo per la qualità delle acque in quanto da un'idea del carico salino generale. Nella tab. 2 pertanto vengono sinteticamente presentati i dati di conducibilità elettrica e di portata relativi alle acque in zona montana di alimentazione.

Area	PORTATA (l/s)		C.E. (µS/cm)	
	February	May	February	May
Zapotal river	676	320	50	60
Aldea Zapotal	466	60	55	65
S.Ana river	599	124	61	67
Piedras river	405	152	126	150

Tab. 2 - Portate e Conducibilità Elettrica Specifica delle acque superficiali

La qualità delle acque superficiali nella zona montana di alimentazione è buona con tendenza ad un netto peggioramento man mano che ci si avvicina alla zona più densamente urbanizzata a causa di un forte inquinamento dovuto soprattutto a scarichi civili ed industriali che, molto spesso, si riversano nei fiumi senza alcun tipo di processo depurativo.

Nei grafici di Fig. 11 e Fig. 12 vengono messi, in relazione con la portata, i tre parametri significativi per l'inquinamento in periodo di morbida e di magra.

In particolare nella Fig. 11 si è preso in considerazione il sistema Rio S.ta Ana-Rio Pedras-Rio Bermejo; si osserva, già a monte della città e appena a valle della zona industriale Bermejo (dove vi sono alcune industrie casearie, di produzione di birra, di concia delle pelli), una notevole impennata del COD con aumento della portata e totale assenza dell'ossigeno disciolto. Più a valle, dove il Bermejo sfocia in acquitrini e lagune con numerose piante acquatiche, appena a monte della laguna Yucutuma, il COD diminuisce e ricompare l'ossigeno disciolto; ciò è spiegabile con processi di fitodepurazione

alii, 1993a, 1993b; HAZEN & SAWYER, 1994; ESA, 1994; VARGAS, 1994; EXPERCO INTERNATIONAL, 1994; FONDO ARGENTINO DE COOPERACION, 2000; SIGNANINI & GASPARRI, 2002). Measurements were carried out in two phases: one in a low water period and one in a moderate water period. Flow rates were measured in the field and, at the same time, water samples were taken for chemical analysis and chemical-physical parameters. The chemical-physical parameters considered and the chemical parameters analysed in the laboratory were as follows:

- temperature, pH, specific electric conductivity, turbidity;
- Na⁺, K⁺, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, SO₄⁻, Cl⁻, HCO₃;
- Fe, Mn, Cr, Cu, Cd, Pb, Zn;
- N_{organico}, N-NH₄⁺, N-NO₂⁻, N-NO₃⁻;
- P_{totale}, P-PO₄³⁻;
- Total dissolved solids, total suspended solids, suspended solids, sedimentable solids;
- BOD₅, COD, DO₂;
- Fecal coliforms, total coliforms.

The specific electric conductivity parameter, correlated with the flow rate, was chosen by us as an indicative parameter for the water quality, since it gives us an idea of the general saline content. Table 2 shows, in synthesis, Specific Electric Conductivity and Flow rate data that characterise the water quality in the mountain

Mountain Area	FLOW RATE (l/s)		E.C. (µS/cm)	
	February	May	February	May
Zapotal river	676	320	50	60
Aldea Zapotal	466	60	55	65
S.Ana river	599	124	61	67
Piedras river	405	152	126	150

Tab. 2 - Flow rate and specific Electric Conductivity of surface waters

recharge area.

The superficial water quality in the mountain feeding area, is good, tending towards a distinct worsening as one approaches the more densely urbanised area, because of high pollution due above all to civil and industrial waste that is often discharged into the rivers without any type of purification process.

The graphs in Fig. 11 and Fig. 12 show the three significant pollution parameters, in relation to the flow rate, in low and moderate water periods.

The S.Ana river-Piedras river-Bermejo river system is considered in particular in Fig. 11; we see a notable uptun in COD with an increase in flow rate and the total absence of dissolved oxygen upstream from the town and downstream from the Bermejo industrial area (where there are some cheese-factories, breweries and leather tanneries). Further downstream, where the Bermejo river flows into marshland and lagoons with numerous aquatic plants, just upstream from the Yucutuma lagoon, the COD decreases and dissolved oxygen reappears; this can be explained by the phyto-purification processes

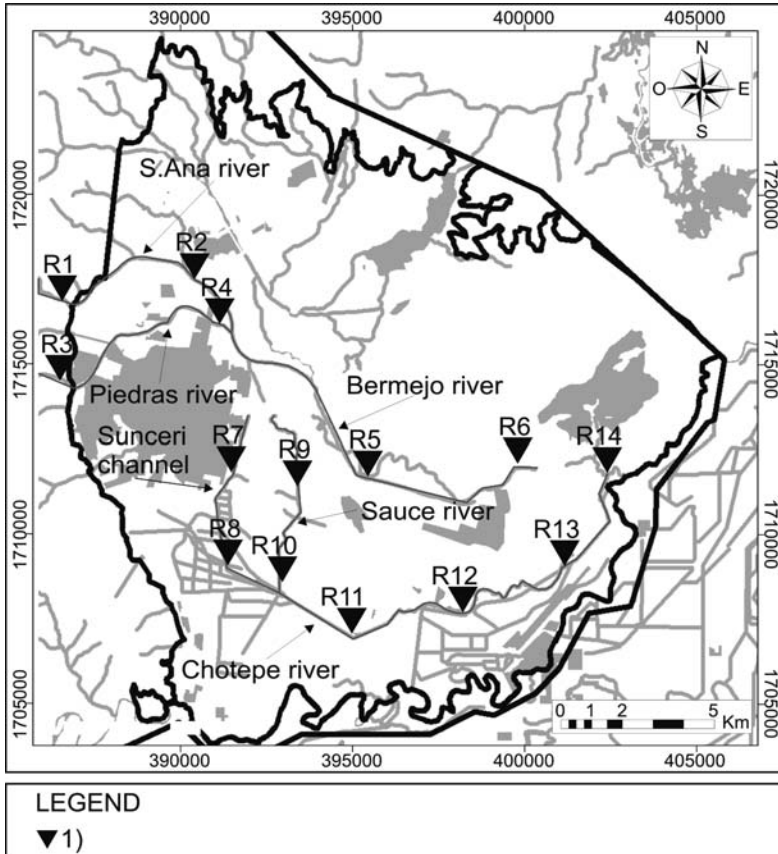


Fig. 10 - Carta dei punti di monitoraggio della qualità delle acque. 1) punti di monitoraggio
 - Map of the quality water observation points. 1) observation points

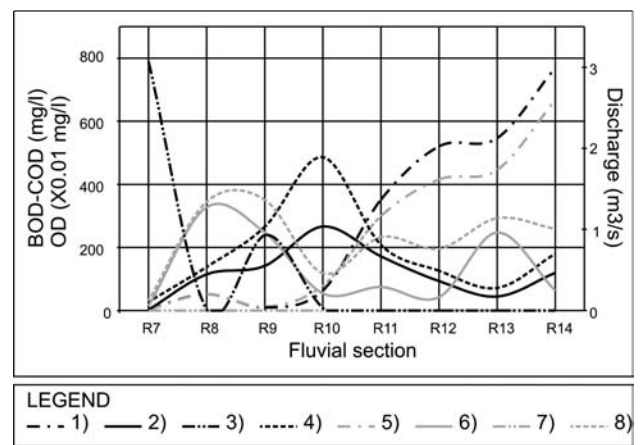
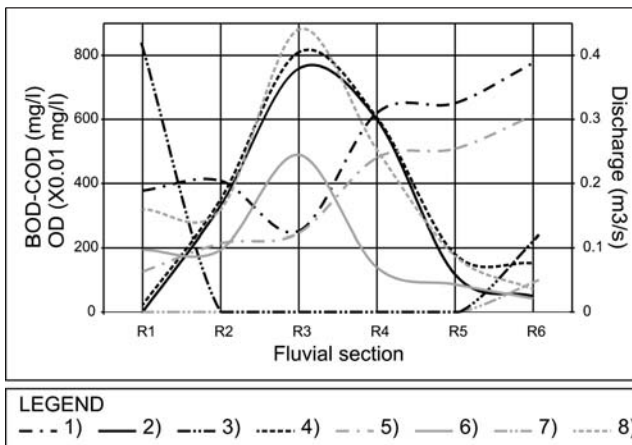


Fig. 11 - Sistema fluviale Rio Piedras - Rio S. Ana - Rio Bermelo. 1) Portata di morbida; 2) BOD₅ in periodo di morbida; 3) OD in periodo di morbida; 4) COD in periodo di morbida; 5) Portata di magra; 6) BOD₅ in periodo di magra; 7) OD in periodo di magra; 8) COD in periodo di magra
 - Piedras river - S. Ana river - Bermejo river fluvial system. 1) Moderate flow; 2) BOD₅ in the moderate flow; 3) OD in the moderate flow; 4) COD in the moderate flow; 5) Low flow; 6) BOD₅ in the low flow; 7) OD in the low flow; 8) COD in the low flow

Fig. 12 - Sistema fluviale Canal Sunceri - Rio Sauce - Rio Chotepe. 1) Portata di morbida; 2) BOD₅ in periodo di morbida; 3) OD in periodo di morbida; 4) COD in periodo di morbida; 5) Portata di magra; 6) BOD₅ in periodo di magra; 7) OD in periodo di magra; 8) COD in periodo di magra
 - Sunceri channel - Sauce river - Chotepe river fluvial system. 1) Moderate flow; 2) BOD₅ in the moderate flow; 3) OD in the moderate flow; 4) COD in the moderate flow; 5) Low flow; 6) BOD₅ in the low flow; 7) OD in the low flow; 8) COD in the low flow

legata alla vegetazione lagunare ed al clima caldo favorevole a tale processo (VARGAS, 1994). Nel grafico di Fig. 12, relativo al sistema Rio Sauce-Canal Sunceri-Rio Chotepe, sono evidenti gli alti tenori di COD dovuti in prevalenza ad inquinamento organico di tipo domestico (LOTTI & ASSOCIATI, 2003).

Il bacino del Rio Manchagua

Le acque di tipo chimico 4 solfato-clorurato-alcino (Fig. 5) che si rinvengono nel bacino del Rio Manchagua (Fig. 2) presentano caratteristiche chimiche molto particolari con pH = 4 e C.E. > 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Una possibile spiegazione che giustifichi la presenza di tali acque potrebbe essere la seguente: tra il plutone e le rocce incassanti che caratterizzano il bacino del Rio Manchagua (Fig. 2) si è avuto un intenso idrotermalismo con formazione di nuovi minerali tra cui Solfuri metallici. Le acque piovane, penetrando all'interno dell'aureola di contatto, hanno provocato l'ossidazione dei Solfuri a Solfati con forte solubilizzazione dei sali per cui il pH si è abbassato e la C.E. aumentata. Gli affluenti del Rio Manchagua, che non intersecano tale aureola, presentano pH quasi neutri e C.E. non elevate.

Il Manchagua presenta una situazione complessa poiché in alcuni periodi dell'anno il pH rimane intorno alla neutralità (6.5-7), mentre in alcuni altri periodi le acque di detto fiume presentano pH molto acidi e raggiungono talora valori intorno a 5. La seconda anomalia è legata al fatto che precedentemente all'uragano Mitch del 1998 (LOTTI & ASSOCIATI, 2002), che ha interessato quasi tutto il Centro America, ciò non era mai stato osservato almeno nei termini di queste grandi oscillazioni di pH; le antiche misure infatti mostrano variazioni del pH tra 5 e 7 (NORPLAN, 1987). Le osservazioni dirette hanno permesso di fornire una spiegazione ragionevole di tale fenomenologia che può essere vista in questi termini. Una serie di filoni idrotermali nonché una mineralizzazione disseminata a solfuri misti, ha interessato la sequenza metamorfica nell'area dell'alto Manchagua costituita principalmente da argilloscisti a basso grado di metamorfismo. L'alterazione di questo complesso produceva un cappellaccio di notevole potenza costituito da litoidi inglobati in argilla (derivante dal disfacimento della roccia) e caratterizzato quindi dall'aver una ridotta permeabilità; in questo materiale, reso di ambiente riducente per la presenza dei solfuri, che peraltro hanno una bassa solubilità, circolava una quantità di acqua molto piccola. In occasione dell'uragano Mitch (LOTTI & ASSOCIATI, 2002), su questa coltre alterata si impostava una gigantesca frana e una grande quantità di materiale veniva a giorno sia sulle pareti e sia, relativamente all'accumulo di frana che peraltro risultava più grande rispetto alla situazione precedente, soprattutto lungo l'alveo del fiume. In queste condizioni il materiale a solfuri, esposto all'ossigeno atmosferico, cambiava la sua composizione trasformandosi in solfato relativo ai vari metalli che sono principalmente Fe, Mn, Co e Ni, sali questi molto solubili e anche idrolizzabili. Ciò può spiegare perché, soprattutto alla fine della stagione secca ed in corrispondenza delle prime forti piogge, si possa passare da acque a

linked to the lagoon vegetation and to the climate that favours these processes (VARGAS, 1994). Fig. 12 graph refers to the Sauce river-Sunceri channel-Chotepe river system; here, high levels of COD can be observed, mainly due to domestic organic pollution (LOTTI & ASSOCIATI, 2003).

The Rio Manchagua basin

The chemical type 4 sulphate-chlorine-alkaline waters (Fig. 5) found in the Rio Manchagua basin (Fig. 2) have very unusual chemical characteristics with pH = 4 and C.E. > 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. A possible explanation which would justify the presence of these waters may be the following: between the pluton and the surrounding rocks, that characterise the Rio Manchagua basin (Fig. 2), there has been intense hydrothermal activity with the formation of new minerals including metallic sulphurs. Rainwater, penetrating inside the contact aureole, has caused oxidation of the sulphurs to sulphates with strong solubilisation of the salts. This has caused the lowering of the pH values and increasing E.C. The Rio Manchagua effluents, which do not intersect this aureole, have almost neutral pH values and quite low E.C. values.

The situation in the Manchagua area is complex since at certain times of the year, the pH is more or less neutral (6.5-7), while at other times of the year the waters of this river have very acid pH values and sometimes reach acidic values of around 5. The second anomaly is connected with the fact that these large oscillations in pH had never been observed before Hurricane Mitch in 1998 (LOTTI & ASSOCIATI, 2002), which affected almost the whole of Central America; previous measurements, in fact, show a pH varying between 5 and 7 (NORPLAN, 1987). Direct observations have made it possible to produce a rational explanation for this set of phenomena. A series of hydrothermal seams, along with a scattered mixed-sulphur mineralisation, affected the metamorphic sequence of the upper Manchagua area, mainly comprising clay schists with a low metamorphic rate. The alteration in this system produced a very thick overburden outcrop comprising lithoids embedded in clay (deriving from rock decomposition) and therefore having a reduced permeability. A very small amount of water circulated in these materials, which were deposited in a reducing environment as indicated by the presence of sulphurs, characterised by a low solubility.

At the time of Hurricane Mitch (LOTTI & ASSOCIATI, 2002), a huge landslide occurred on this altered layer and a large amount of material outcropped on both sides of the landslide and especially in the area of accumulation of the landslide. The amount of accumulated material was much larger compared with the previous situation, along the river bed. Under these conditions, the sulphurous material, exposed to atmospheric oxygen, changed in composition and transformed the various metals - mainly Fe, Mn, Co and Ni - into their relative sulphates; these salts are both very soluble and also hydrolysable. This may explain why, especially at the end of the dry season and at the time of the first heavy rains, there is a change from

pH quasi neutri e con Fe e Mn in quantità non eccessiva, ad acque acidissime (pH inferiori a 3) e contenuti di Fe e Mn dell'ordine dei grammi/litro (LOTTI & ASSOCIATI, 2002, 2003; SIGNANINI & GASPARRI, 2002).

CONCLUSIONI

Nell'area montana di alimentazione dell'acquifero di San Pedro Sula, le acque provenienti da bacini con graniti, di tipo bicarbonato-calcico-sodico, sono molto leggere con conducibilità basse e pH neutri. Le acque legate ad aureole di contatto sono di tipo solfato-clorurato a pH acidi. Le acque di circolazione profonda, in corrispondenza dei lineamenti tettonici del graben, sono di tipo bicarbonato-alciano a pH basico ed elevate conducibilità e temperature. Per quanto riguarda le acque bicarbonato-calciche, quelle di Aldea El Carmen sono probabilmente legate alla dissoluzione della calcite presente nelle fratture indice di una estesa circolazione idrica, mentre quelle che emergono nell'area del Chamalecon sono legate alle facies carbonatiche mesozoiche affioranti immediatamente a S. Condizioni particolari si sono invece riscontrate nel bacino dell'alto Manchaguala dove l'attivarsi di una gigantesca frana ha portato a giorno e disseminato lungo l'alveo del fiume, una enorme quantità di materiale a solfuri che, a contatto con l'ossigeno atmosferico, ha dato luogo a facies mineralogiche a solfati di Fe, Mn, Co e Ni, sali altamente solubili ed idrolizzabili che giustificano gli alti valori di conducibilità elettrica specifica e i valori acidi del pH. Per quanto riguarda il chimismo, in zona montana le acque, siano esse superficiali che sotterranee, sono di buona qualità e per nulla contaminate fatta eccezione per una contaminazione organica legata ad attività pastorizie. Spostandoci verso le zone distali di conoide e verso la pianura, la qualità dell'acqua peggiora.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori desiderano ringraziare la società ASP (Agua De San Pedro) per aver permesso la pubblicazione di questo studio. Un ringraziamento all'Ing. Marco Ricciardulli, Ing. Lorenzo Gasparri, Ing. Claudia Enamorado, Dr.ssa Miriam Mejia, Dr. Ernesto Vargas, Dr. Rodolfo Menjivar, Dr. Marlon Sierra, Dr. Simone Di Santo, Dr. Antonio Gennarini per la loro preziosa collaborazione.

OPERE CITATE / REFERENCES

- CARRUTHERS R.M. (1983) - *Geophysical surveys in Honduras to assist groundwater resource evaluation studies: October 1982-January 1983*. Institute of Geological Sciences, Overseas Development Administration, AGU report no. 148, London.
- CELICO P. (1993) - *Prospezioni geochimiche. Prospezioni idrogeologiche*, volume primo: 306-471.
- C. LOTTI & ASSOCIATI (2002) - *Estudio para la proteccion ambiental e acuífero del valle de Sula y de las fuentes de agua de la reserva forestal del Merendon. Informe final*.
- C. LOTTI & ASSOCIATI (2003) - *Plan Maestro de Alcantarillado Sanitario de San Pedro Sula, Honduras*.
- DIMA & MONCADA G.L. (1994) - *Integracin del sistema de abastecimiento de agua de los sectores norte y nor-este de San Pedro Sula-Cortes. Informe final*. DIMA informe, Vol. I.
- DIMA, HAZEN & SAWYER (1994) - *Estudio del Plan Maestro de alcantarillado de la ciudad de San Pedro Sula y el desarrollo de una primera etapa de amplificación y mejoras del sistema actual. Informe final*. DIMA informe, Vol.II, Base de planeamento y deseno.
- DONNELLY T.M., HORNE G.S., FINCH R.C. & LÓPEZ RAMOS E. (1991) - *Northern Central America: The Maya and Chortis Blocks*: in *The Geology of North America*,

water with almost neutral pH and with amounts of Fe and Mn that are not excessive, to very acid waters (with pH lower than 3) and Fe and Mn contents in the order of grams/litre (LOTTI & ASSOCIATI, 2002, 2003; SIGNANINI & GASPARRI, 2002).

CONCLUSIONS

In the mountain area, feeding the San Pedro Sula aquifer, the bicarbonate-calcic-sodium waters coming from the granite basins are very light, with low conductivity and neutral pH. The waters linked to contact aureoles are sulphate-chloride with an acid pH. Deep circulating waters, along the tectonic lines of the graben, are bicarbonate-alkaline with basic pH, high conductivity and high temperatures. With regard to the bicarbonate-calcic waters, those of Aldea El Carmen are probably linked to the dissolution of calcite present in the fractures, indicating a broad water circulation pattern, while those emerging in the Chamalecon area are linked to Mesozoic carbonatic facies emerging immediately to the south. Unusual conditions were found in the high Manchaguala basin where a huge landslide has brought an enormous amount of sulphide material to the surface and scattered it along the river bed; on contact with the atmospheric oxygen, this material has given rise to mineralogical facies of Fe, Mn, Co and Ni sulphates - highly soluble and hydrolysable salts that justify the high rates of specific electric conductivity and the acid pH values. With respect to water quality, the mountain area waters, both surface and underground, are of good quality and in no way contaminated, except for organic contamination linked to stock-rearing activity. Moving towards the distal fan areas and towards the plain, water quality worsens.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to express their thanks to ASP (Agua De San Pedro) society for allowing the publication of this work. Thanks to Dr. Marco Ricciardulli, Dr. Lorenzo Gasparri, Dr. Claudia Enamorado, Dr.ssa Miriam Mejia, Dr. Ernesto Vargas, Dr. Rodolfo Menjivar, Dr. Marlon Sierra, Dr. Simone Di Santo, Dr. Antonio Gennarini for their most useful collaboration.

COMPOSIZIONE DELLE ROCCE E QUALITA' DELLE ACQUE NELL'AREA DI SAN PEDRO SULA (HONDURAS)

- H: The Caribbean Region. Geol. Soc. Am., Boulder, Co. USA (Dengo, G. and J.E. Case, eds.) pp. 37-76.
- ELVIR A.R. (1974) - *Mapa Geológico de la República de Honduras*. Instituto Geográfico Nacional.
- ELVIR A.R. (1976) - *Síntesis de la geología de Honduras*. Informe y trabajos técnicos presentados en la IV Reunión de Geólogos de América Central. Publicaciones Geológicas del ICAITI, pp. 1-4.
- ENEE (EMPRESA NACIONAL DE ENERGIA ELECTRICA) (1988) - *Estudio de pre-factibilidad geotermica en la region central de Honduras*. Informe Final. V. 2, 2a. Tegucigalpa, Honduras.
- EPPLER D., FAKUNDINY R. & RITCHIE A. (1986) - *Reconnaissance evaluation of Honduran geothermal sites*. Los Alamos National Laboratory, p. 15.
- ESA (1994) - *La caracterisacion y la medicion de los desechos industriales*.
- EXPERCO INTERNATIONAL (1994) - *Inventario de Industrie de San Pedro Sula*.
- FINCH R. C. (1981) - *Mesozoic stratigraphy of central Honduras*. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, **65**: 1320-1333.
- FINCH R. C. (1986) - *Catalog of known hot springs and thermal place names for Honduras*. Los Alamos National Laboratory, 13 pp.
- FONDO ARGENTINO DE COOPERACION (2000) - *Residuos toxicos y peligrosos*.
- FOYE W. G. (1918) - *Notes on a collection of rocks from Honduras, Central America*. Journal of Geology, **26**: 524-531.
- GIORGETTI F. & SIGNANINI P. (1976) - *Nuovi contributi al problema delle relazioni tra parametri geofisici ed idraulici nello studio degli acquiferi alluvionali*. Boll. Geof. Teor. Appl., **XIX**, **69**: 24-30.
- GROSS L.M. (1994) - *Integracion del sistema de abastecimiento de agua de los sectores norte y norte-este de San Pedro Sula*.
- HAASE P., SAGASTUME M. & ENAMORADO C.B. (1993a) - *Plan de protection y manejo de los recursos hidricos en el Municipio de San Pedro Sula, Cortes*.
- HAASE P., SAGASTUME M. & ENAMORADO C.B. (1993b) - *Control sobre el uso del suelo para proteger las aguas subterranea San Pedro Sula, Cortes*.
- HAZEN & SAWYER (1994) - *Estudio del Plan Maestro de alcantarillado de la ciudad de San Pedro Sula y el desarrollo de una primera etapa de amplificacion y mejoras del sistema actual, descripcion ambiental del sito del proyecto*.
- HIDRO SISTEMAS (1998) - *Proyecto de urbanizacion Los Prados de Cordoba, San Pedro Sula, Departamento de Cortes, Seccion V, Suministro de agua potable*.
- HORNE G.S., CLARK G.S. & PUSHKAR P. (1976) - *Pre-Cretaceous Rock of North-Western Honduras, Basement terrains in Sierra de Omoa*. The American Association of Petroleum Geophisics Bulletin, **60**, 4: 566-583.
- MCKENZIE A.A. (1995) - *A hydrogeological database for Honduras*. Geological Society Special Publications, **97**: 157-162., Geological Society of London. London, United Kingdom.
- MILLS RICHARD A. (1991) - *Honduras*. Bulletin, Houston Geological Society, **34**, **2**: 16-17, 19, 21, 23.
- NORPLAN (1986a) - *Estudio Hidrogeologico, San Pedro Sula, Cortes. Reporte Final*.
- NORPLAN (1986b) - *Informe de estudio hidrogeologico, pruebas cortas de bombeo en 17 pozos existentes*.
- NORPLAN (1987) - *San Pedro Sula, Estudio hidrogeologico, Reporte final*.
- NORPLAN (1990) - *Informe de estudio hidrogeologico, investigacion de agua subterraneas y resultados de 15 perforaciones exploratorias en el area de San Pedro Sula*.
- PACIFIC CONSULTANTS (1994a) - *The Master Plan study on the erosion and sediment control in the pilot river basin, Choloma, San Pedro Sula, Cortes in the Republic of Honduras, Final report, Supporting report*. Pacific consultants International in association with Kosusai Kogyo CO., LTD., Tokyo.
- PACIFIC CONSULTANTS(1994b) - *The Master Plan study on the erosion and sediment control in the pilot river basin, Choloma, San Pedro Sula, Cortes in the Republic of Honduras, Final report, Main report*. Pacific consultants International in association with Kosusai Kogyo CO., LTD., Tokyo.
- PACIFIC CONSULTANTS (1994c) - *The Master Plan study on the erosion and sediment control in the pilot river basin, Choloma, San Pedro Sula, Cortes in the Republic of Honduras, Final report, Preliminary Environmental Assessment report*. Pacific consultants International in association with Kosusai Kogyo CO., LTD., Tokyo.
- PATINO L.C. (1993) - *Geochemical traverse across Honduras*. Tesis de Masters inedita, Rutgers, The State University of New Jersey, 71 pp.
- PIERCE HERBERT A. & RIVERA-MONTES J.C. (1991) - *Preliminary bibliography of the geology and mineral deposits of Honduras*. Open-File Report - U. S. Geological Survey. OF 91-0102 47 pp.
- POMPER (1999) - *The ground water situation in and around San Pedro Sula*.
- ROMANO A. & SIGNANINI P. (1981) - *Alcune tecniche di elaborazione dei dati ricavati da sondaggi elettrici applicati a ricerche idrogeologiche in aree particolarmente complesse*. Studi Geologici Camerti, **VII**: 115-121.
- SIGNANINI P. & GASPARRI L. (2002) - *Studio di un acquifero alluvionale in area tropicale, S. Pedro Sula, Honduras*. Studi Geologici Camerti.
- VARGAS E. (1994) - *Estudio sobre Laguna El Carme y Laguna Yucutuma*.
- WILLIAMS H. & MCBIRNEY A.R. (1969) - *Volcanic History of Honduras*. University of California, Publications in Geological Sciences, **85**: 101 pp.

Received October 2005 - Accepted February 2006