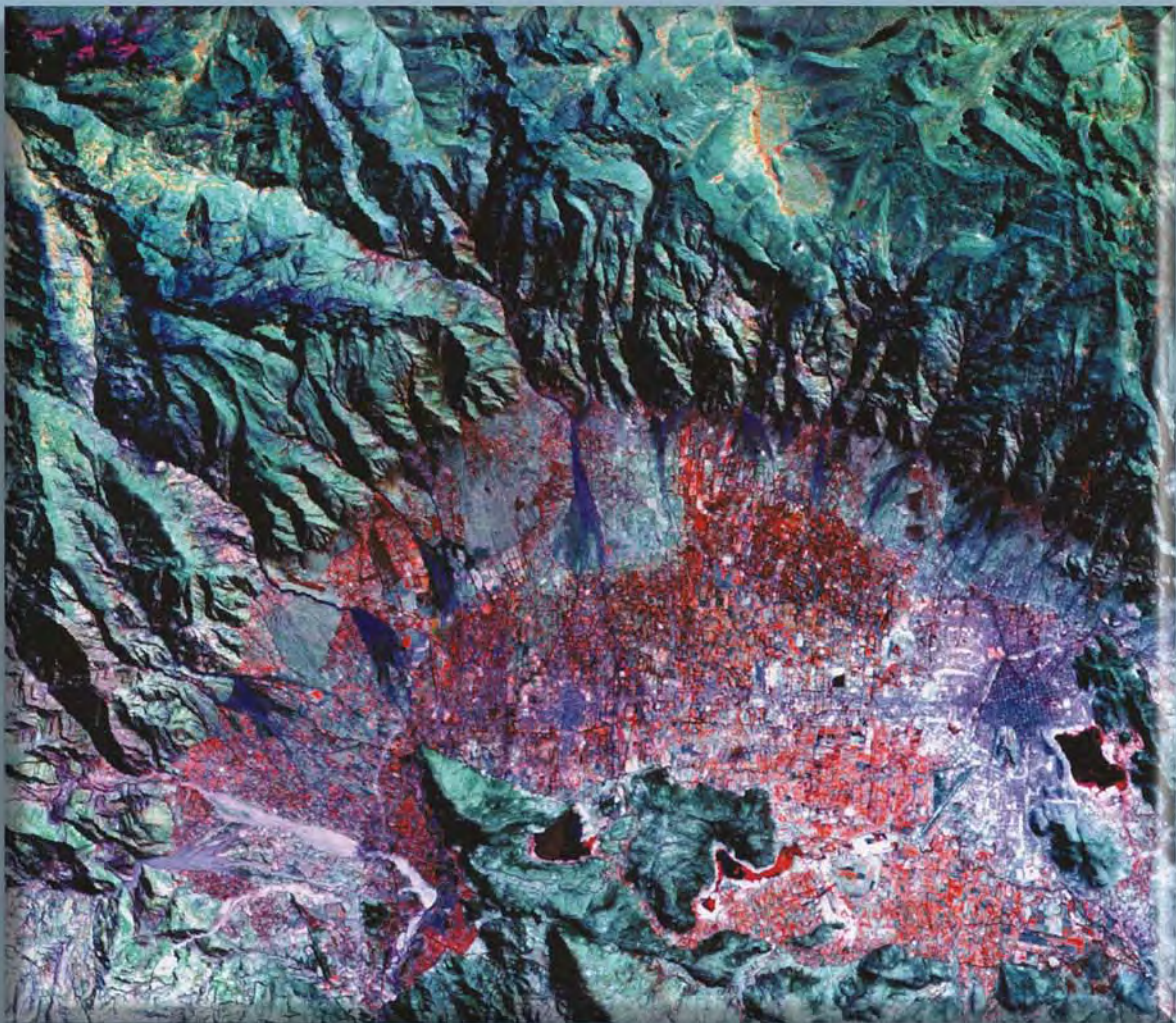


Geología e Hidrogeología del Valle Central de Cochabamba

Geology and Hydrogeology of the Central Valley of Cochabamba

Sven Renner & Carlos Velasco



BOLETIN DEL SERVICIO NACIONAL DE GEOLOGIA Y MINERIA N° 34, AÑO 2000



BGR

**GEOLOGIA E HIDROGEOLOGIA DEL
VALLE CENTRAL DE COCHABAMBA**
*GEOLOGY AND HYDROGEOLOGY OF THE CENTRAL
VALLEY OF COCHABAMBA*

CONVENIO ALEMAN BOLIVIANO DE AGUAS SUBTERRANEAS (CABAS)
German Bolivian Agreement on Groundwater (CABAS)

Sven Renner & Carlos Velasco

GEOLOGIA E HIDROGEOLOGIA DEL VALLE CENTRAL DE COCHABAMBA

GEOLOGY AND HYDROGEOLOGY OF THE CENTRAL VALLEY OF COCHABAMBA

CONVENIO ALEMAN BOLIVIANO DE AGUAS SUBTERRANEAS (CABAS)

German Bolivian Agreement on Groundwater (CABAS)

INDICE / INDEX

	Página, page
INDICE DE FIGURAS / <i>INDEX OF FIGURES</i>	v
INDICE DE MAPAS DETALLADOS / <i>INDEX OF DETAILED MAPS</i>	vii
ABREVIACIONES / <i>ABBREVIATIONS</i>	viii
1 INTRODUCCION.....	1
1 INTRODUCTION.....	1
2 ASPECTOS GENERALES DE LA CUENCA DEL VALLE CENTRAL DE COCHABAMBA.....	4
2 GENERAL ASPECTS OF THE BASIN OF THE COCHABAMBA CENTRAL VALLEY.....	4
2.1 Descripción del área.....	5
2.1 Description of the area.....	5
2.2 Clima.....	8
2.2 Climate.....	8
2.2.1 Precipitaciones.....	9
2.2.1 Precipitation.....	9
2.2.2 Temperatura.....	11
2.2.2 <i>Temperature</i>	11
2.2.3 Evapotranspiración potencial.....	13
2.2.3 <i>Potential evapotranspiration</i>	13
2.3 Vegetación.....	13
2.3 Vegetation.....	13
2.4 Ambiente hidrográfico.....	13
2.4 Hydrographic environment.....	13
2.5 Aguas superficiales.....	14
2.5 Surface waters.....	14
2.6 Población.....	15
2.6 Population.....	15
2.7 Demanda de agua potable.....	15

2.7	Drinking water demand.....	15
2.8	Abastecimiento de agua	15
2.8	Water supply	15
3	GEOLOGIA.....	18
	<i>GEOLOGY</i>	18
3.1	Geomorfología	18
3.1	Geomorphology	18
3.2	Estratigrafía del Paleozoico hasta el Terciario; mapa geológico / Stratigraphy of the Paleozoic to the Tertiary; geological map	20
3.2.1	Sistema ordovícico (O)	21
3.2.1	<i>Ordovician (O)</i>	21
3.2.2	Sistema silúrico (S).....	22
3.2.2	<i>Silurian (S)</i>	22
3.2.3	Sistema devónico (D).....	24
3.2.3	<i>Devonian (D)</i>	24
3.2.4	Sistema pérmico (P).....	25
3.2.4	<i>Permian (P)</i>	25
3.2.5	Sistema cretácico (K).....	25
3.2.5	<i>Cretaceous (K)</i>	25
3.2.6	Sistema terciario (T)	25
3.2.6	<i>Tertiary (T)</i>	25
3.3	El Cuaternario (Q) en el Valle Central.....	26
3.3	The Quaternary (Q) in the Central Valley.....	26
3.3.1	Sedimentos superficiales en el Valle de Cochabamba: mapeo sedimentológico	27
3.3.1	Superficial sediments in the Valley of Cochabamba: sedimentological mappin.	27
3.3.2	Sedimentos superficiales en la Cordillera de Cochabamba	31
3.3.2	Surface sediments in the Cordillera of Cochabamba	31
3.3.3	Edad de los sedimentos	34
3.3.3	<i>Age of the sediments</i>	34
3.3.4	Interpretación cronológica de la evolución del Valle Central desde el Plioceno	35
3.3.4	Chronological interpretation of the evolution of the Central Valley since the Pliocene.....	35
3.4	Geología estructural	36
3.4	Structural geology	36
4	Investigaciones geofísicas.....	39
4	<i>GEOPHYSICAL RESEARCH</i>	39
4.1	Introducción	39
4.1	Introduction.....	39
4.2	Investigación geofísica por el PIRHC.....	40
4.2	Geophysical research by PIRHC.....	40
4.2.1	Mapa de resistencia transversal.....	41
4.2.1	Map of transversal resistivity	41
4.2.2	Profundidad del basamento.....	41
4.2.2	<i>Depth of the basement</i>	41
4.2.3	Análisis	43
4.2.3	Data analysis	43
4.3	Investigación geofísica por el Proyecto CABAS	43

4.3	Geophysical research by the CABAS- Project.....	43
4.3.1	Representación de los datos en corte transversal	45
4.3.1	<i>Visualization of the data in cross-sections</i>	45
4.3.2	Mapa de resistencia transversal / <i>Map of transversal resistivity</i>	53
4.3.3	Profundidad del basamento.....	55
4.3.3	Depth of the basement	55
4.4	Estudio mediante sondeos audiomagnetotéluricos por SEURECA–BRGM–SOGREAH–CGL.....	56
4.4	Investigations using audiomagnetotelluric soundings by SEURECA-BRGM-SOGREAH-CGL ...	56
4.4.1	Topografía y geometría del zócalo ordovícico.....	56
4.4.1	Topography and geometry of the Ordovician Basement	56
4.4.2	Relleno cuaternario de la cuenca	56
4.4.2	Quaternary filling of the basin	56
4.4.3	Análisis	58
4.4.3	Analysis	58
5	Pozos profundos en el valle central.....	59
5	DEEP WELLS IN THE CENTRAL VALLEY	59
5.1	Pozo profundo “Noroeste El Paso 1”	60
5.1	Deep drilling "Noroeste El Paso 1".....	60
5.2	Pozo profundo “Tiquipaya 1”	63
5.2	Deep well "Tiquipaya 1"	63
5.3	Pozo de investigación Cb- 308 III, Paucarpata	65
	Well of research Cb- 308 III, Paucarpata.....	65
5.4	Análisis	66
5.4	Analysis	66
6	Hidrogeología / <i>HYDROGEOLOGY</i>	67
6.1	Mapeo hidrogeológico	67
6.1	Hydrogeological Mapping	67
6.1.1	Grupo I: Acuíferos en depósitos porosos no consolidados	68
6.1.1	Group I: Aquifers in unconsolidated porous deposits.....	68
6.1.2	Grupo II: Acuíferos en rocas fracturadas	72
6.1.2	Group II: Aquifers in fractured rocks	72
6.1.3	Grupo III: Acuíferos locales (en rocas porosas o fracturadas) o regiones sin aguas subterráneas en cantidades apreciables	73
6.1.3	Group III: Local aquifers (in porous or fractured rocks) or regions without groundwaters in noticeable quantities.....	73
6.2	Áreas de recarga y descarga.....	74
6.2	Recharge and discharge areas	74
6.3	Piezometría	75
6.3	Hydraulic head.....	75
6.4	Parámetros hidráulicos y rendimiento de pozos.....	81
6.4	Hydraulic parameters and well yields.....	81
6.5	Balance hídrico	82
6.5	Water balance.....	82
7	Hidroquímica	87

7	<i>HYDROCHEMISTRY</i>	87
7.1	Composición iónica	87
7.1	Ionic composition.....	87
7.2	Análisis bacteriológicos	93
7.2	Bacteriological analyses.....	93
7.3	Aptitud del agua subterránea para consumo humano y para riego.....	93
7.3	Aptitude of the groundwater for human consumption and for irrigation	93
7.4	Estudios isotópicos.....	94
7.4	Isotopic studies.....	94
8	manejo del recurso de aguas	96
8	water resource management.....	96
8.1	Aprovechamiento sostenible: Términos generales.....	97
8.1	Sustainable use: General terms	97
8.2	Aprovechamiento sostenible en el Valle Central	99
8.2	Sustainable use in the Central Valley.....	99
9	Resumen y conclusiones	103
9	<i>summary and conclusions</i>	103
	Anexo: Tabla de análisis efectuados por el Proyecto CABAS / <i>ANNEX: TABLE OF ANALYSES CARRIED OUT BY THE CABAS PROJECT</i>	107
	REFERENCIAS / <i>REFERENCES</i>	109

INDICE DE FIGURAS / INDEX OF FIGURES

Fig. 1:	Vista panorámica del Valle Central de Cochabamba / Panoramic view of the Central Valley of Cochabamba.	1
Fig. 2:	Imagen satelital del Valle Central; Landsat TM, 08 de mayo 1985 / Satellite image of the Central Valley; Landsat TM, 08 of May 1985	2
Fig. 3:	Mapa topográfico del Valle, Central de Cochabamba / Topographic map of the Central Valley of Cochabamba	4
Fig. 4:	Mapa morfológico del Valle Central de Cochabamba / Morphologic map of the Cochabamba Central Valley.	5
Fig. 5:	Datos y diagrama del promedio de la precipitación mensual. / Data and diagram of the average of monthly precipitation.	7
Fig. 6:	Ubicación de las estaciones meteorológicas y pluviométricas y mapa de isoyetas basado en los datos de precipitación del año 1996 / Location of the climatic and pluviometric stations and map of isohyets based on the precipitation data in 1996.....	10
Fig. 7:	Precipitación anual en el Valle Central (Fuente: Jordán, 1992) / Annual precipitation in the Central Valley (Source: Jordán, 1992).....	11
Fig. 8:	Los sistemas de captación de aguas superficiales para el abastecimiento de agua de Cochabamba / The collecting systems of superficial waters for the watersupply of Cochabamba.....	17
Fig. 9:	Lagunas de origen glacial que abastecen a la ciudad de Cochabamba / Lagoons of glacial origin that supply the city of Cochabamba	20
Fig. 10:	Esquema geológico de la cuenca de Cochabamba propuesto por el PIRHC (GEBOL - NNUU, 1978) / Geological scheme of the basin of Cochabamba as suggested by the PIRHC (GEBOL - UN, 1978).....	28
Fig. 11:	La evolución de la cuenca de Cochabamba durante el Plio- Pleistoceno / The evolution of the Cochabamba basin during the Plio- Pleistocene	38
Fig. 12:	Mapa de resistencia transversal elaborada por el PIRHC (GEBOL - NNUU, 1978) / Map of transversal resistivity made by PIRHC (GEBOL - UN, 1978)	39
Fig. 13:	Mapa de la potencia del relleno plio-cuaternario elaborado por el PIRHC (GEBOL - NNUU, 1978) / Map of the thickness of the pliocene- quaternary filling, produced by the PIRHC (GEBOL - UN, 1978).....	42
Fig. 14:	Ubicación de sondeos eléctricos verticales y perfiles geoelectricos efectuados por CABAS (Fielitz et al., IT CABAS N°8, 1992) / Location of vertical resistivity surveys and geoelectric profiles carried out by CABAS (Fielitz et al., IT CABAS N°8, 1992)	44
Fig. 15:	Corte geoelectrico A – A' (Fielitz et al., IT CABAS N°8, 1992) / Geoelectric profile A - A' (Fielitz et al., IT CABAS N°8, 1992).....	46
Fig. 16:	Corte geoelectrico B – B' (Fielitz et al., IT CABAS N°8, 1992) / Geoelectric profile B - B' (Fielitz et al., IT CABAS N°8, 1992).....	47
Fig. 17:	Corte geoelectrico C – C' (Fielitz et al., IT CABAS N°8, 1992) / Geoelectric profile C - C' (Fielitz et al., IT CABAS N°8, 1992).....	48

Fig. 18:	Corte geoelectrico D – D' (Fielitz et al., IT CABAS N°8, 1992) / Geoelectric profile D - D' (Fielitz et al., IT CABAS N°8, 1992).....	49
Fig. 19:	Corte geoelectrico G – G' (Fielitz et al., IT CABAS N°8, 1992) / Geoelectric profile G - G' (Fielitz et al., IT CABAS N°8, 1992).....	50
Fig. 20:	Corte geoelectrico H – H' (Fielitz et al., IT CABAS N°8, 1992) / Geoelectric profile H - H' (Fielitz et al., IT CABAS N°8, 1992).....	51
Fig. 21:	Corte geoelectrico K – K' (Fielitz et al., IT CABAS N°8, 1992) / Geoelectric profile K - K' (Fielitz et al., IT CABAS N°8, 1992).....	52
Fig. 22:	Mapa de resistencia transversal de sedimentos cuaternarios entre las profundidades de 50 y 200 m / Map of transversal resistivity of quaternary sediments between the depths of 50 and 200 m	54
Fig. 23:	Topografía del zócalo paleozoico en el Valle Central en base a sondeos audiomagnetotelúricos (SEURECA etc., 1994) / Topography of the Paleozoic basement in the Central Valley based on audiomagnetotelluric soundings (SEURECA etc, 1994).....	55
Fig. 24:	Zonificación de la cuenca en base al espesor de los depósitos plio-cuaternarios (SEURECA–BRGM–SOGREAH–CGL, 1994) / Zoning of the basin according to the thickness of the Pliocene- Quaternary deposits (SEURECA-BRGM-SOGREAH-CGL, 1994)	57
Fig. 25:	Caudales de producción (en l/s) en el pozo El Paso 1 (SEMAPA, datos no publicados) / Flows of production (in l/s in the well El Paso 1 (SEMAPA, unpublished data).....	60
Fig. 26:	Niveles dinámicos (en mbbp) en el pozo de explotación El Paso 1 (SEMAPA, datos no publicados) / Dynamic levels (in mbbp) in the producing well El Paso 1 (SEMAPA, unpublished data)	60
Fig. 27:	Perfil litológico y perfil de pozo de la perforación El Paso 1 / Lithological profile and profile of drilling (drilling log ?) of the perforation El Paso 1	61
Fig. 28:	Perfil litológico y perfil de pozo de la perforación Tiquipaya 1 / Lithological profile and profile of drilling (drilling- log ?) of the perforation "Tiquipaya 1	62
Fig. 29:	Perfil litológico y perfil de pozo de la perforación Cb-308 III, Paucarpata / Lithological profile and drilling profile of the perforation Cb-308 III, Paucarpata.....	62
Fig. 30:	Zonas de recarga y descarga, según PIRHC, 1978 / Areas of recharge and discharge, according to PIRHC, 1978	76
Fig. 31:	Red de observación de niveles piezométricos de CABAS / SERGEOMIN / Monitoring network of piezometric levels of CABAS / SERGEOMIN	77
Fig. 32:	Mapa piezométrico del Valle Central en base a una combinación de los datos de nivel de CABAS/SERGEOMIN y SEMAPA/BRGM / Piezometric map of the Central Valley based on a combination of the data of CABAS/SERGEOMIN and SEMAPA/BRGM	78
Fig. 33:	Variaciones del nivel freático. Los niveles están relacionados a la profundidad bajo boca de pozo. / Variations of the groundwater level. The levels are related at the depth under mouth of well	79
Fig. 34:	Mapa de transmisividades del Valle Central y línea de confinamiento (basado en SEURECA–BRGM–SOGREAH–CGL, 1994) / Map of transmissivity of the Central Valley and of confinement line (based on SEURECA-BRGM-SOGREAH-CGL, 1994)	80
Fig. 35:	Línea de confinamiento y pozos surgentes (basado en SEURECA–BRGM–SOGREAH–CGL, 1994) / Extension of confines Groundwater conditions and location of artesian wells (based on SEURECA–BRGM–SOGREAH–CGL, 1994).....	81

Fig. 36:	Mapa de ubicación de puntos de muestreo hidroquímico efectuado por el Proyecto CABAS. / Location of hydrochemical sampling points carried out by the CABAS Project.....	88
Fig. 37:	Zonas hidroquímicas del Valle Central en base a los análisis químicos efectuados por CABAS / Hydrochemical zones of the Central Valley according the chemical analyses carried out by CABAS.	89
Fig. 38:	Diagramas PIPER de los resultados de análisis químicos de las aguas subterráneas / PIPER-diagrams representing the results of chemical groundwater analysis	90

INDICE DE MAPAS DETALLADOS / INDEX OF DETAILED MAPS

Mapa 1: Carta Geológica del Valle Central de Cochabamba / Geologic Map of the Central Valley of Cochabamba.....	23
Mapa 2: Carta del Cuaternario del Valle Central de Cochabamba / Map of cuaternary Formations in the Central Valley of Cochabamba	33
Mapa 3: Carta Hidrogeológica del Valle Central de Cochabamba / Hydrogeologic Map of the Central Valley of Cochabamba	70

ABREVIACIONES / ABBREVIATIONS

Parámetros y unidades

Parameters and units

A	Altura, en m s.n.m. (metros sobre el nivel del mar) <i>Height, in m (meters above sea level)</i>
CE	conductividad eléctrica, en μS/cm (micro Siemens por centímetro) <i>electrical conductivity, in μS/cm (micro Siemens per centimeter)</i>
e	Edad, en años Bp (antes del presente) <i>Age, in years Bp (before the present)</i>
Eh	potencial de reducción y oxidación (actividad electrónica) <i>Redox-Potential (electronic activity)</i>
Lat S, Long. O	Latitud Sur, Longitud Oeste, en ° (grados) y ` (minutos)
Lat S, Lat W	<i>Latitude South, Longitude West, in °(degrees) and `(minutes)</i>
K	conductividad hidráulica en m/s (metros por segundo) <i>hydraulic conductivity in m/sec (meters per second)</i>
P	Presión atmosférica, en mb (milibarios) <i>Atmospheric pressure, in mb (millibars)</i>
p	Precipitación anual, en mm (milímetros) <i>Annual precipitation, in mm (millimeters)</i>
pH	medida cuantitativa de la acidez o basicidad de un líquido, sin unidad <i>quantitative measure of the acidity or basicity of a liquid, without unit</i>
Q	Caudal, en l/s (litros por segundo) <i>Flow rate l/sec (liters per second)</i>
Qs	Caudal específico, en l/(s m) (litros por segundo y metro de abatimiento) <i>Specific flow, in l/s m (liters per second and meter drawdown)</i>
RAS	relación de adsorción del sodio, sin unidad
SAR	<i>sodium adsorption ratio, without unit</i>
ρ	Resistividad, en ohm m (ohmios metro) <i>Resistivity, in ohm m (Ohm-meter)</i>
pt	Resistencia transversal, en ohm m² (ohmios metro cuadrado) <i>Transversal resistivity, in ohm m² (ohms square meter)</i>
S	coeficiente de almacenamiento, sin unidad <i>storage coefficient, without unit</i>
T	Transmisividad, en m²/s (metros cuadrados por segundo) <i>Transmissivity, in m²/s (squaremeters per second)</i>
t	Temperatura en °C (grados centígrados) <i>Temperature in °C (degree centigrades)</i>
TSD	Total sólidos disueltos, en mg/l (miligramos por litro)
TDS	<i>Total dissolved solids, in mg/l (milligrams per liter)</i>
UFC	unidades fecales contadas
CFU	<i>counted fecal units</i>
UTM	Universal Transversal Mercator, en m (metros) <i>Universal Transversal Mercator, in m (meters)</i>
v	Velocidad, en km/h (kilómetros por hora) o m/s (metros por segundo) <i>velocity, in km/h (kilometers per hour) or m/sec (meters per second)</i>

Nombres y Términos

Names and Terms

BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Instituto Federal para Geociencias y Recursos Naturales <i>Federal Institute for Geosciences and Natural Resources</i>
BRGM	Bureau de Recherches Géologiques et Minières (France) <i>Office of geologic and mining research (France)</i>
C.B.F.	Corporación Boliviana de Fomento <i>Bolivian Corporation of Promotion</i>
CABAS	Cooperación Alemano-Boliviana en Aguas Subterráneas <i>German-Bolivian Agreement about Groundwater</i>
COFADENA	Corporación de las Fuerzas Armadas de Desarrollo <i>Corporation of the Armed Forces for Development</i>
GEOBOL	Servicio Geológico Boliviano <i>Bolivian Geological Service</i>
N, S, E, O	Norte, Sur, Este Oeste
N, S, E, W	<i>North, South, East, West</i>
NNUU	Naciones Unidas
UN	<i>United Nations</i>
PIRHC	Proyecto Integrado de Recursos Hídricos de Cochabamba <i>Integrated Project of Hydric Resources of Cochabamba</i>
SEMAPA	Servicio Municipal de Agua Potable y Alcantarillado <i>Municipal Service of Drinking Water and Sewerage</i>
SENAMHI	Servicio Nacional de Meteorología y Hidrología <i>National Service of Meteorology and Hydrology</i>
SERGEOMIN	Servicio Nacional de Geología y Minería (anteriormente GEOBOL) <i>National Service of Geology and Mining (former GEOBOL)</i>
SEV	Sondeo Eléctrico Vertical <i>Vertical Resistivity log</i>
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
ZAPL	Zona de Acumulación Polínica Local <i>Zone of Local Polinic Accumulation</i>

Prologo / Prologue

El presente boletín es un producto del Convenio Alemán – Boliviano sobre Aguas Subterráneas (Proyecto CABAS), un proyecto de cooperación técnica Boliviano - Alemán, financiado por el Ministerio de Cooperación Económica y Desarrollo de Alemania (BMZ) y ejecutado por el Instituto Federal de Geociencias y Recursos Naturales de Alemania (BGR) y el Servicio Nacional de Geología y Minería de Bolivia (SERGEOMIN) entre los años 1991 y 2000.

En este trabajo se reúne no solamente una parte importante de los trabajos realizados en el marco de CABAS, sino también la comparación de sus resultados con los trabajos pertinentes realizados anteriormente. Se reúne y resume información que se encuentra dispersa en numerosos informes, publicaciones y archivos sobre la geología, sedimentología, hidrogeología e hidroquímica, así poniendo a disposición gran parte del conocimiento actual sobre el tema.

Dr. Sven Renner
Jefe Proyecto CABAS

The present bulletin is a product of the Convenio Alemán - Boliviano en Aguas Subterráneas (German - Bolivian Agreement on Groundwaters, CABAS Project), a project funded by the German Federal Ministry of Economic Cooperation and Development and carried out by the Federal Institute of Geosciences and Natural Resources of Germany (BGR) and the National Service of Geology and Mining of Bolivia (SERGEOMIN). The project was carried out between 1991 and 2000.

This work not only comprises outcomes of the field campaigns of the CABAS project, but also includes a comparison with previous works. It presents and summarizes a large number of reports on the geology, sedimentology hydrogeology and hydrochemistry of the area, thus giving an overview of what is currently known about the subject.

Dr. Jorge Alvarado
Jefe del Departamento de Hidrogeología
SERGEOMIN

1 INTRODUCCION

Más de la tercera parte del territorio boliviano comprende el Altiplano y la zona de los Valles, donde se sitúa la cuenca del Valle Central de Cochabamba. Este área tiene clima árido a semiárido, precipitaciones moderadas y alta evapotranspiración, por lo que es susceptible a problemas de escasez de agua.

Al mismo tiempo el incremento acelerado de la población en el Valle Central de Cochabamba ha resultado en una mayor demanda de agua, principalmente para consumo humano y riego

Las aguas subterráneas en la cuenca de Cochabamba han sido explotadas mediante pozos excavados desde la época de la colonia habiendo continuado su uso durante la República. A principios del siglo se iniciaron las primeras perforaciones mecánicas de pequeño diámetro mediante equipos simples a percusión.

1 INTRODUCTION

More than a third of Bolivia's territory includes the High Plateau of the Altiplano and the so-called Zone of the Valleys, where the basin of the Cochabamba Central Valley is situated. This area enjoys an arid to semi-arid climate, moderate rainfalls and high evapotranspiration. It is therefore known to suffer from water shortages.

At the same time, the rapid population growth in the Central Valley of Cochabamba has created an even greater demand for water, mainly needed for human consumption and irrigation.

The groundwater in the Cochabamba basin has been exploited through the use of excavated wells since colonial times and through the Republican period. At the beginning of this century, the first mechanical perforations of small diameter were drilled with simple percussion equipment.



Fig. 1: Vista panorámica del Valle Central de Cochabamba / Panoramic view of the Central Valley of Cochabamba.

La existencia de pozos surgentes, perforados en la zona de descarga de la cuenca, dio lugar a una indiscriminada utilización. Los pozos fluían continuamente, durante todo el año, produciendo un descenso del nivel freático regional, en principio lento.

Las primeras instituciones que se dedicaron a la perforación de pozos de agua, recolectando información técnica confiable, fueron las unidades de Aguas Subterráneas de la Corporación de las Fuerzas Armadas de Desarrollo (COFADENA) y de la Corporación Boliviana de Fomento (C. B. F.)

The existence of artesian wells, perforated in the basin's discharge area, gave place to an unsustainable level of exploitation. The wells flowed continuously through the year, causing a descent of the regional groundwater level - slowly in the beginning.

The first institutions dedicated to the perforation of wells, who gathered reliable technical information, were the groundwater sections of the Corporation of the Armed Forces of Development (COFADENA) and of the Bolivian Corporation of Promotion (Corporación Boliviana de Fomento, C.B.F.)

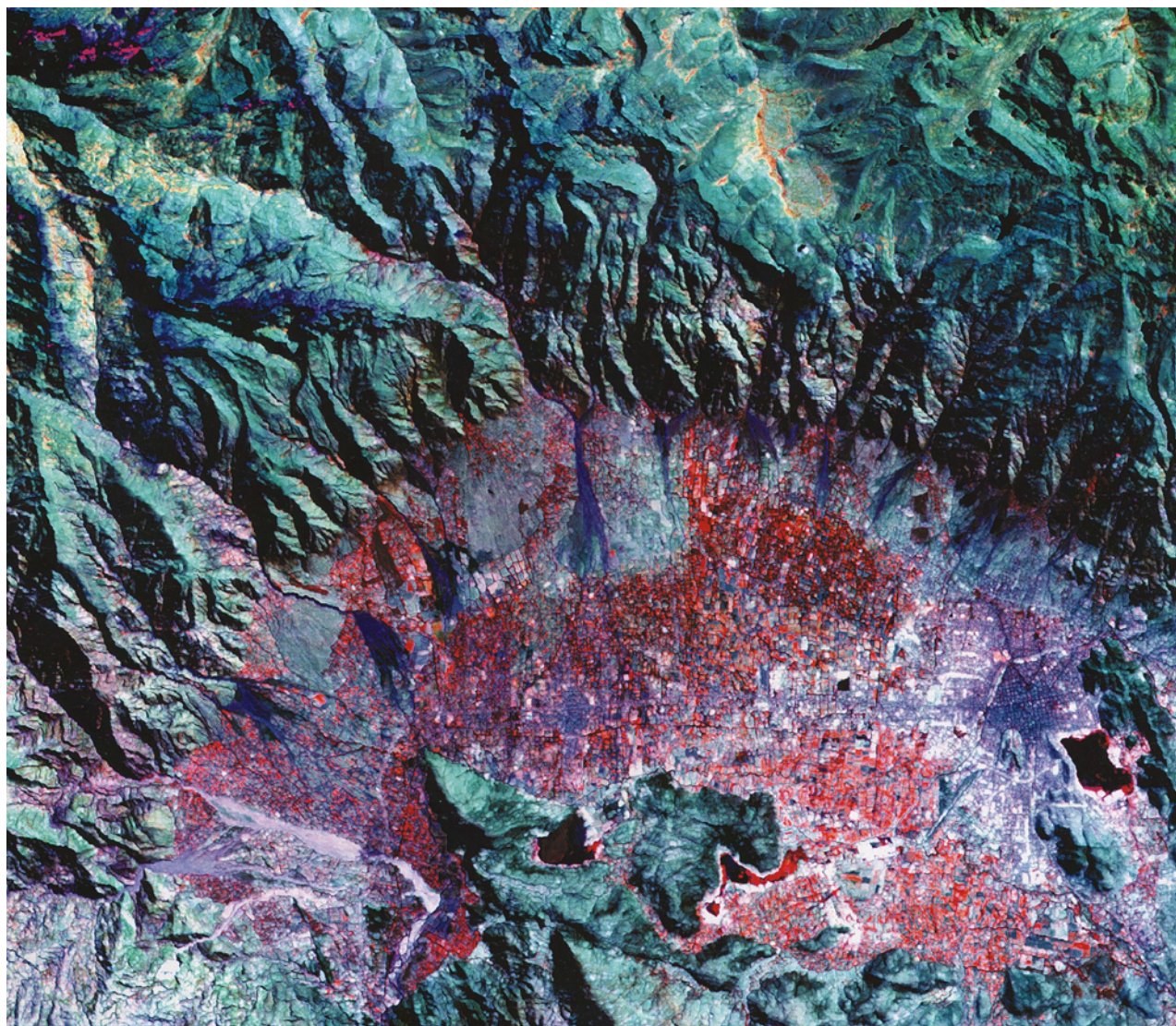


Fig. 2: Imagen satelital del Valle Central; Landsat TM, 08 de mayo 1985 / Satellite image of the Central Valley; Landsat TM, 08 of May 1985

Desde un principio, las perforaciones de pozos de explotación se ha visto confrontada con el problema de la gran complejidad del sistema acuífero del Valle Central de Cochabamba. Se ha evidenciado una gran heterogeneidad vertical y lateral en los sedimentos, lo que se debe a la presencia de un complicado sistema de abanicos aluviales y deltas lacustres, donde los materiales se depositaban en forma alternante. Las interdigitaciones de los abanicos aluviales, como consecuencia del frecuente cambio de los cauces de los ríos y niveles lacustres que ocurrieron en el Cuaternario, hacen que estos depósitos sean difícilmente correlacionables.

Los acuíferos del Valle Central almacenan un enorme reservorio de aguas subterráneas que seguirán siendo la fuente principal de agua hasta que se ponga en funcionamiento el proyecto Misicuni, que consiste en el transvase de las aguas de la vertiente norte de la Cordillera del Tunari (donde las precipitaciones pluviales son considerablemente mayores).

Para programar la explotación sostenible de las aguas subterráneas del Valle Central se requiere la evaluación de toda la información disponible que se refiere a la distribución areal del agua subterránea, las características hidráulicas del subsuelo y la calidad del agua. En base a esta información es necesario estudiar la factibilidad técnica y económica de su aprovechamiento y su aptitud para diferentes usos.

En los próximos capítulos se expondrá la información actualmente disponible sobre los recursos de aguas subterráneas del Valle Central de Cochabamba. La información consiste en la descripción general del área y luego de sus características geológicas, con énfasis en las formaciones cuaternarias las cuales almacenen los recursos de agua subterráneos. Una amplia parte del informe está dedicada a los resultados de las investigaciones geofísicas que, conjuntamente con los conocimientos obtenidos a través de las perforaciones profundas, constituyen la información fundamental acerca de la estructura y el volumen de los recursos hídricos del valle. La parte que sigue describe las características hidráulicas y el rendimiento de los acuíferos, incluyendo un mapeo hidrogeológico. La última sección del presente trabajo enfoca la calidad de las aguas y su aptitud para diferentes usos.

From the beginning, the perforations of pumping wells had to cope with the great complexity of the aquifer system of the Central Valley of Cochabamba. A great vertical and lateral heterogeneity in the sediments has always been evident, which is due to the presence of a complicated system of alluvial cones and lacustrine deltas, where the materials settled in an alternate form. The interfingering of the alluvial cones, a consequence of the frequent shifting of the river beds and lake levels which occurred in the Quaternary, make these deposits hard to correlate.

The aquifers of the Central Valley store an enormous reservoir of groundwaters that will remain the main source of water until the Misicuni-project or an alternative large scale water supply system is put into operation. Misicuni consists of conveying waters from the northern slope of the Tunari mountain range where the rainfalls are considerably higher.

To plan the sustainable exploitation of the Central Valley groundwaters it is necessary to analyse the available information referring to the distribution of the subsurface water, the hydraulic characteristics of the underground and the quality of the water that is required. Based on this information it is necessary to study the technical and economic feasibility of its exploitation and its suitability for different uses.

In the following chapters, the actually available information on groundwater resources in the Central Valley of Cochabamba will be exposed. The information consists of general description of the area and of its geological characteristics, with emphasis on the quaternary formations that store most of the groundwater resources. A wide part of the report is dedicated to the results of the geophysical research that, together with the information obtained from deep perforations, make up the basic information about the structure and the volume of the hydric resources of the valley. What follows is a description of the hydraulic characteristics and the yield of the aquifers, including a hydrogeological mapping. The last section of this report focuses on the quality of the waters and its suitability for different uses.

2 ASPECTOS GENERALES DE LA CUENCA DEL VALLE CENTRAL DE COCHABAMBA

En los próximos capítulos se utilizarán mapas temáticos simplificados como la Fig. 3 para representar aspectos geológicos, climáticos, topográficos, hidrogeológicos etc. La escala es aproximadamente 1 : 200.000. La cuadrícula utilizada es de 1000 metros UTM zona 19. Los mapas diferencian tres colores, los cuales corresponden a los rellenos fluvio lacustres en el Valle de Cochabamba, a las rocas consolidadas del paleozoico y mesozoico incluyendo las formaciones glaciales en la cordillera, y los abanicos aluviales en el borde del valle (véase Fig. 3). En la Fig. 3 se encuentra una leyenda de elementos topográficos como carreteras, poblaciones etc., que no es repetida en los mapas que siguen.

2 GENERAL ASPECTS OF THE BASIN OF THE COCHABAMBA CENTRAL VALLEY

In the following chapters simplified thematic maps (as the Fig. 3) will be used to represent geological, climatic, topographical, hydrogeological aspects etc. The scale is approximately 1: 200.000. The used quadrangle is UTM zone 19 of 1000 meters. In the maps, three colors are distinguished: they correspond to (1) the fluvio lacustral fillings in the Cochabamba Valley, (2) the consolidated Paleozoic and Mesozoic rocks including the glacial formations in the Cordillerian range and (3) the alluvial fans located along the edge of the valley (see Fig. 3). Fig. 3 includes a legend of topographical elements such as roads, populations etc., that are not repeated in the following maps.

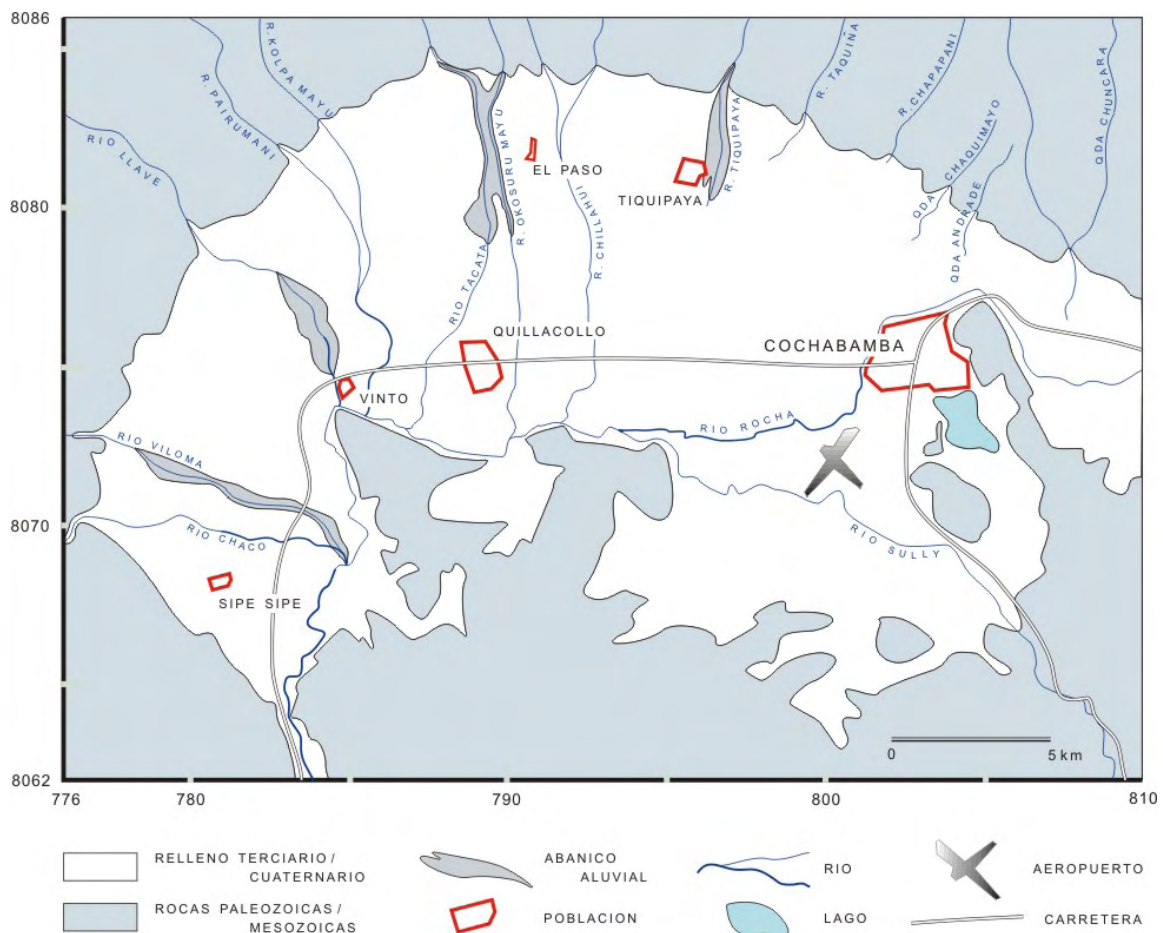


Fig. 3: Mapa topográfico del Valle, Central de Cochabamba / Topographic map of the Central Valley of Cochabamba

2.1 Descripción del área

La cuenca del Valle Central de Cochabamba se encuentra situada en el Departamento del mismo nombre y está delimitada aproximadamente por las siguientes coordenadas UTM (Fig. 3).

Latitud 8083000 - 8070000 N

Longitud 780000 - 800000 E

Fisiográficamente se ubica dentro de la zona de los valles mesotérmicos, implantada en un flanco del macizo montañoso central. Con una superficie de 1.150 km², comprende en su parte norte y oeste los relieves montañosos formados por rocas paleozoicas y cretácicas, cuyas mayores alturas alcanzan 5.000 m s.n.m. (Fig. 4, Mapa 1). Hacia el sur se encuentran montañas que, debido a su mayor denudación, son de menor altura. La cuenca es una fosa tectónica que, por largos períodos de tiempo, ha estado ocupada por un lago. De esta forma, las partes más profundas del relleno sedimentario del valle están compuestas por depósitos lacustres. En el curso de varios ciclos la cobertura del lago aumentaba y disminuía. En épocas de gran extensión, la sedimentación en el área del valle era mayormente de origen lacustre.

2.1 Description of the area

The basin of the Cochabamba Central Valley is situated in the Department of the same name and is delimited approximately by the following UTM-coordinates (Fig. 3).

Latitude 8083000 - 8070000 N

Longitude 780000 - 800000 E

Physiographically it is situated in the area of the mesothermic valleys in a flank of the central mountainous massif. With a surface of 1.150 km² it is made up in its northern and western part by mountainous reliefs formed by Paleozoic and Cretaceous rocks, whose highest peaks reach 5.000 m above sea-level (Fig. 4, Map1). Towards the south there are also mountains, which, due to their more intense denudation, are of minor altitude. The valley is a tectonic basin that, for long periods of time, was occupied by a lake. Therefore, lake deposits make up the deepest parts of the sedimentary filling of the valley. In the course of several cycles the areal extension of the lake increased and decreased. During periods of great extension, the sedimentation in the area of the valley was mainly lacustrine.

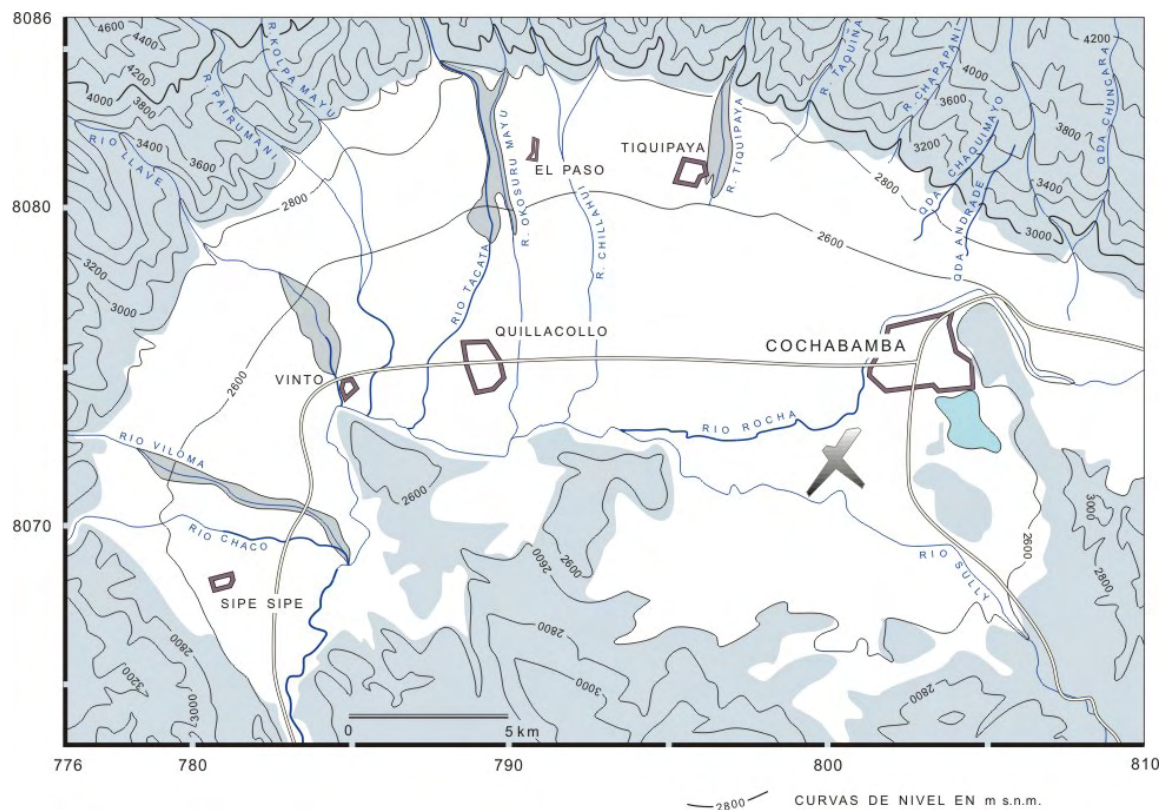


Fig. 4: Mapa morfológico del Valle Central de Cochabamba / Morphologic map of the Cochabamba Central Valley.

La disminución de la extensión del lago descubría grandes superficies de terrenos planos, característicos de las llanuras lacustres, sobre los cuales corrían ríos divagantes que depositaban en sus cauces materiales aluviales gruesos, provenientes de la cordillera que limita la parte norte y oeste de la cuenca.

Posteriormente, al subir el nivel de las aguas, las planicies aluviales y rellenos de cauce eran cubiertos nuevamente por las aguas, iniciándose de esta manera una nueva deposición de sedimentos lacustres finos en las partes más profundas de la cuenca.

Las variaciones de altura en la cuenca del Valle Central de Cochabamba van desde los 2.470 m s.n.m. en la salida de la cuenca hasta los 5.030 m s.n.m. en el Tunari, que es el pico más alto de la Cordillera del mismo nombre. Hacia el oeste del Valle se tienen serranías con una altura máxima de 4.000 m s.n.m. en el Cerro Toro Huañuna. La planicie de la parte central de la cuenca tiene una elevación media de 2.600 m s.n.m. (Fig. 4).

Gran parte del área cordillerana está cubierta por rocas del Paleozoico (Ordovícico, Devónico y Silúrico) y en forma reducida por rocas mesozoicas (Cretácico). El Cenozoico en su mayor extensión es ocupado por depósitos cuaternarios y en un mínimo porcentaje por depósitos terciarios (Mapa 1).

En la cordillera, como consecuencia de la última glaciación, en forma local, se observan sedimentos glaciales y gran número de pequeñas lagunas residuales.

En la parte norte y oeste de la cuenca, donde los ríos con fuerte pendiente depositan su carga en terrenos más bajos y de menor inclinación, se formaron depósitos de abanicos aluviales. La formación de los abanicos es producida principalmente por los torrentes en la época de las crecidas, cuando aumentan los volúmenes de agua y depositan sus materiales de arrastre al pie de las montañas. La unión de una serie de abanicos aluviales adyacentes formaron las llanuras aluviales de pie de monte o bajadas. En la imagen satelital (Fig. 2) se distinguen varios abanicos en el área septentrional de la cuenca.

The decrease in the extension of the lake exposed large flat surfaces, characteristic of the lacustrine plains, on which meandering rivers deposited thick alluvial material along their courses, flowing from the Cordilleran range that limits the northern and western part of the basin.

Later, with increasing water level, the alluvial plains and fillings of the riverbed were covered again by water, a new deposition of fine lake sediments took place in the deepest parts of the basin.

The altitude in the basin of the Central Valley of Cochabamba varies between 2.470 m above sea level at the bottom of the basin and 5.030 m at the Tunari peak, the highest point of the range of the same name. Towards the west of the valley the mountain ranges have maximum elevation of 4.000 m in the Toto Huañuna Mountain. The plain of the central part of the basin has an average elevation of 2.600 m (Fig. 4).

Much of the area of the Cordillera is made up of Paleozoic rocks (Ordovician, Silurian and Devonian) and in minor extent by Mesozoic rocks (Cretaceous). The Cenozoic in its largest extension is represented by Quaternary deposits and in a minimum percentage by Tertiary sediments (Map 1).

In the Cordillera, as consequence of the most recent glaciación, locally glacial sediments and a large number of small residual lagoons can be found.

In the northern and western parts of the basin, where the rivers with high gradients deposit their carried material in lower lands with less inclination, deposits of alluvial cones were formed. The formation of fans is caused mainly by torrents during the high water season, when the water volume increases and deposit their dragging-materials at the foot of the mountains. Combined adjacent alluvial cones formed the alluvial piedmont-plains. In the satellite image (Fig. 2), several fans are distinguished in the northern area of the basin.

Estos abanicos constituyen las áreas más importantes para el aprovechamiento de sus aguas subterráneas. Los acuíferos reciben su recarga natural principalmente por infiltración directa de la lluvia y por la percolación del agua que llega de la cordillera por medio de los ríos y arroyos (Solís & Araguás, 1995) y también, aunque en una menor cantidad, por la infiltración del agua de riego.

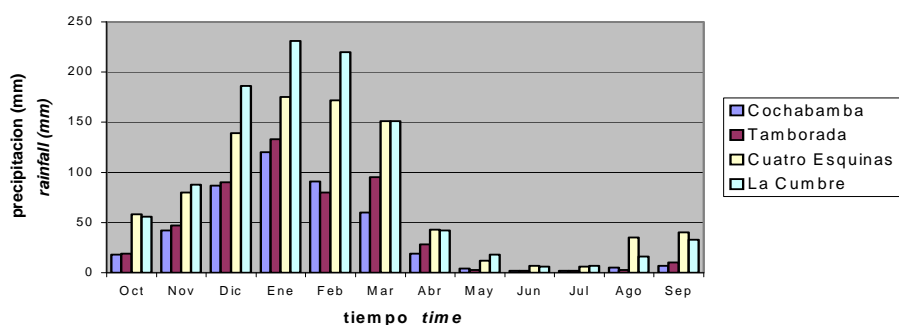
En la parte central de la cuenca se encuentran depósitos cuaternarios de origen mayormente lacustre y fluvio-lacustre. Litológicamente están constituidos principalmente por arcillas y limos, cuyas características no son favorables para el aprovechamiento de sus aguas subterráneas. Sin embargo, algunos horizontes conglomerádicos y arenosos en posibles depósitos deltáicos adquieren importancia en la transmisión y el almacenamiento del agua subterránea.

Dadas las condiciones fisiográficas y climatológicas, el régimen de los ríos y arroyos provenientes de la cordillera es de tipo torrencioso. Poseen pendientes fuertes y en su recorrido originan cañadones profundos en las partes más bajas de la montaña y en los mismos abanicos aluviales.

These fans constitute the most important areas for groundwater exploitation. The aquifers obtain their natural recharge mainly from direct rain water infiltration, from the percolation of surface waters descending from the range through rivers and brooks (Solís & Araguás, 1995) and, to a lesser degree, through the infiltration of irrigation water.

In the central part of the basin quaternary deposits of mainly lacustrine and fluvio-lacustrine origin are found. Lithologically these consist basically of clays and muds, whose characteristics make them unfavorable for groundwater exploitation. However, some conglomeratic and sandy horizons in deltaic deposits are important for the transmission and the storage of subsurface water.

Due to the physiographic and climatological conditions, the rivers and brooks flowing down from the range are of torrential type. They have steep slopes and in their course they cut steep canyons into the lowest parts of the mountain and into their own alluvial cones.



Localidad Place	Provincia Province	Lat S	Lon E	Elev. m s.n.m. Elevation	Período (años) Period (years)
Cochabamba	Cercado	17° 23'	66° 10'	2 570	49-92
Tamborada	Cercado	17° 27'	66° 08'	2 600	72-92
Cuatro Esq.	Quillacollo	17° 14'	66° 18'	3 500	67-83
La Cumbre	Quillacollo	17° 19'	66° 14'	4 000	67-87

Fig. 5: Datos y diagrama del promedio de la precipitación mensual. Fuente: Development Alternatives Inc. (DAI), Análisis Agroclimático del Departamento de Cochabamba, 1993 / Data and diagram of the average of monthly precipitation. Source: Development Alternatives Inc. (DAI), Análisis Agroclimático del Departamento de Cochabamba, 1993.

2.2 Clima

El Valle de Cochabamba se encuentra en el cinturón trópico. Su clima es templado, sin destacados cambios térmicos en el curso del año, con precipitaciones pluviales en verano, semiseco en otoño y con invierno y primavera seco.

Sin embargo, debido principalmente a las diferencias de altura, varía dentro de cortas distancias. En las partes bajas entre 2.500 y 2.800 m s.n.m. es templado y semiárido. A mayor altura disminuyen las temperaturas y aumentan las precipitaciones, presentándose consecuentemente un cambio gradual hacia un clima más frío y más húmedo.

Por regla general, las precipitaciones, la humedad relativa del aire y la velocidad del viento se incrementan con la altitud mientras la temperatura, la presión atmosférica, la presión de vapor y en consecuencia la evaporación y la evapotranspiración disminuyen.

2.2 Climate

The Cochabamba valley lies in the tropic belt. Its climate is temperate and suffers no drastic thermal changes during the year, with rainfalls in summer, semiarid conditions in autumn and with dry conditions during winter and spring.

However, mainly because of the differences in elevation, the climate varies widely over short distances. In the lower parts between 2.500 and 2.800 m above sea-level it is moderate and semi-arid. At higher altitude, the temperatures decrease and the rainfalls increase, thus presenting a gradual change towards a colder and drier climate.

Normally, the rainfalls, the relative humidity of the air and the wind speed increase with the altitude while the temperature, the atmospheric pressure, the steam pressure and consequently the evaporation and the evapotranspiration decrease.

Tabla 1: Red de observación pluviométrica y climatológica manejada por el Proyecto CABAS / SERGEOMIN y precipitaciones anuales de 1992 hasta 1996. / Network of pluviometric and climatological observation handled by the CABAS / SERGEOMIN Project and annual rainfalls from 1992 to 1996.

ESTACION	OPERADOR	COORDENADAS		ALTITUD m s.n.m.	PRECIPITACION ANUAL (mm)				
		N	E		1992	1993	1994	1995	1996
Cochabamba	SENAMHI	8073193	801273	2.548	386	491	434	488	404
Cocaraya	COTESU	8072510	782800	2.500	493			452	453
La Cumbre	CABAS	8088248	795667	4.120		1 102	698		464
Jankho Khala	SENAMHI	8088399	781688	4.200	1.070			1.409	
Kapuraya	CABAS	8063099	787838	2.580	562	656	406	647	351
Llave Grande	CABAS	8081784	778185	3.380			632	520	506
Payrumani	SENAMHI	8078151	784318	2.580	584	892	555	576	585
Sarco	SENAMHI	8077070	799186	2.580	432	419	302	492	401
Sehuenkhani	CABAS	8065587	796552	2.660			345	441	230
Suticollo	CABAS	8066805	782783	2.470	597	677	498	851	205
Parque Tunari	COTESU	8080988	801426	3.335		703	600	473	550
Uchu Uchu	CABAS	8078292	768953	3.450			683	770	363
Viloma Grande	COTESU	8074072	779203	2.680	447	723	421	356	549
La Violeta	SENAMHI	8079420	793209	2.610	556	629	350	405	401

Datos de unos pocos años han registrado un promedio de 2.670 horas de sol anuales en los valles o un promedio de 7,3 horas/sol/día. En la Cordillera del Tunari se observa con mayor frecuencia la presencia de nubes (GEBOL - NNUU, 1978).

La presión barométrica fluctúa muy débilmente, mostrando un promedio anual de 750 mb, en la zona baja del área. La humedad relativa varía entre 40% hasta 65% con extremos de aproximadamente 10% y 100%, aumentando en las alturas donde decrece la humedad absoluta (GEBOL - NNUU, 1978).

La velocidad del viento es menor en el mes de mayo, con una media mensual de 0.8 nudos (1.5 km/h), alcanzando 3.2 nudos (5.9 km/h), en el mes de octubre, siendo la dirección predominante nornoroeste. En las alturas las velocidades deben ser mayores pero no existen datos al respecto (GEBOL - NNUU, 1978).

2.2.1 Precipitaciones

La época de lluvias corresponde al período de noviembre hasta abril. Las mayores precipitaciones se producen en el mes de enero y luego en diciembre y febrero, siendo los meses más secos mayo, junio y julio. Por lo general, las precipitaciones son de corta duración y se distribuyen marcadamente con las estaciones, correspondiendo el 87 % de las mismas al verano, el 8 % a los meses transicionales y el 5 % a la época seca.

Existen 4 estaciones pluviométricas en la cuenca del Valle Central de Cochabamba, con datos de varios años (

Fig. 5, Fig. 6).

A partir de noviembre de 1991, CABAS instaló una red de observación pluviométrica en la cuenca del Valle Central de Cochabamba que consta de 14 estaciones pluviométricas, operadas 3 por COTESU, 5 por SENAMHI y 6 por CABAS (Tabla 1, Fig.6).

Por la gran cantidad de información generada por la red pluviométrica, se hizo necesario recurrir una base de datos para almacenar información meteorológica (Ortiz, CABAS IT N°2, 1992).

Los datos son publicados en anuarios pluviométricos (ver Informes Técnicos). Cada uno de los anuarios contiene tablas de datos de precipitaciones diarias, análisis estadísticos e impresión de las probabilidades de precipitaciones extremas con diferentes duraciones, tablas de temperaturas ambientales diarias promedias y gráficos de hidrogramas para las precipitaciones y para

Observations over the last few years have registered an average of 2.670 annual hours of sun in the valleys or an average of 7,3 hours sun/day. In the Tunari- Range clouds are observed more frequently (GEOBOL - UN, 1978).

The barometric pressure fluctuates very little, showing an annual average of 750 mb, in the low region of the area. The relative humidity varies between 40 % and 65 % with extreme values of approximately 10 % and 100 %, increasing in the higher regions where the absolute humidity is less (GEOBOL - UN, 1978).

The wind speed is low in the month of May, with a monthly average of 0.8 knots (1.5 km/h), reaching 3.2 knots (5.9 km/h), in October, NNW being the predominant direction. In higher altitudes, the speeds are supposed to be higher, but there are no data available about it (GEOBOL - UN, 1978).

2.2.1 Precipitation

The rainy season runs from November to April. The heaviest rainfalls happen in January followed by December and February, the driest months are May, June and July. As a rule, rainfalls are short and are distributed markedly with the seasons, 87% of rainfalls during summertime, 8% in the transitional months and 5% in the dry period.

There are 4 pluviometric stations in the basin of the Cochabamba Central Valley, which have collected over several years (

Fig. 5, Fig. 6).

From November 1991, CABAS installed a network of pluviometric observation in the basin of the Cochabamba Central Valley that consists of 14 pluviometric stations, 3 have been operated by COTESU, 5 by SENAMHI and 6 by CABAS (Tabla 1, Fig.6).

Due to the great quantity of information generated by the pluviometric network, it was made necessary to set up a database to store weather information (Ortiz, CABAS IT N°2, 1992).

The data are published in pluviometric yearbooks (see Technical Reports). Each of the year books contains tables of data of daily rainfalls, statistical analyses and prints of the probabilities of extreme rainfalls with different duration, tables of average daily temperatures and diagrams of hydrographs for the rainfalls and for

la comparación con las medidas históricas.

El mapa de isoyetas (Fig. 6) está basado en los datos de precipitación del año 1996 (Tabla 2).

La pluviometría está en función de la topografía y permite dividir la zona en tres áreas. La primera que ocupa la parte central es una llanura plana formada por depósitos fluvio-lacustres. La segunda, situada al pie de la Cordillera del Tunari entre los 2.600 a 2.750 m s.n.m., ligeramente ondulada e inclinada, pertenece a la zona de los depósitos aluviales (abanicos o conos de deyección). El tercer relieve es montañoso y se encuentra ubicado entre los 2.750 y 5.000 m s.n.m.

the comparison with historical measurements.

The map of isohyets (Fig. 6) is based on the data of precipitation of 1996 (Tabla 2).

The pluviometry is controlled by the topography and allows dividing the zone in three areas. The first zone covers the central part and is a flat plain formed by fluvio-lacustrine deposits. The second, situated at the foot of the Tunari- Range between 2.600 at 2.750 m above sea level, shows slightly wavy shapes and inclinations; it is the area of the alluvial deposits (fans or cones of dejection). The third relief is mountainous and is placed between 2.750 and 5.000 m above sea level.

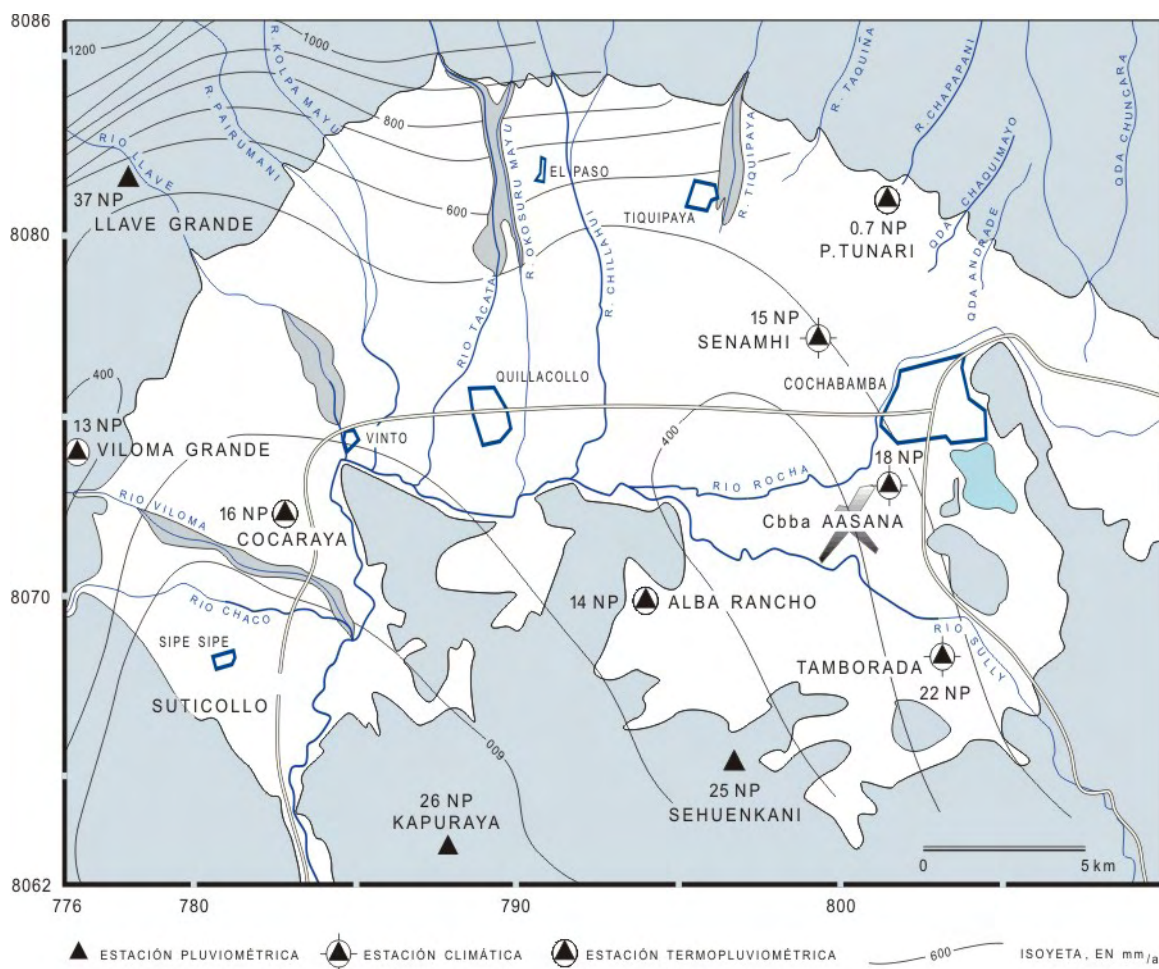


Fig. 6: Ubicación de las estaciones meteorológicas y pluviométricas y mapa de isoyetas basado en los datos de precipitación del año 1996 / Location of the climatic and pluviometric stations and map of isohyets based on the precipitation data in 1996.

Tabla 2: Precipitación en el año 1996 (anuario pluviométrico 1996, Informe técnico, CABAS / Precipitation in 1996 (pluviometric year book 1996, Technical Report, CABAS

	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Tot.
Cochab.	3	93	62	112	8	90	3	0	0	10	8	15	404
Cocaraya	0	115	73	118	46	66	12	0	0	14	9	0	453
P. Tunari	6	41	95	184	74	108	7	0			0	33	548
Viloma	12	133	71	146	66	84	0		2	0	17	15	546
La Violeta	1	93	67	137	13	58	0	0	0	10	7	15	401
Payrumani	1	114	122	194	35	87	1	0	0	14	0	16	584
Sarco	2	101	69	101	11	79	8	0	0	9	10	11	401
La Tambor.	1	96	67	131	15	72	0	0	0	10	10	10	412

Las lluvias en la cuenca del Valle Central de Cochabamba no se distribuyen uniformemente sobre el área, sino que ocurren como chubascos locales. Las precipitaciones varían con la altitud y la localización geográfica desde 800 a 1.300 mm anuales en el sector de la Cordillera del Tunari, mientras que en la llanura del Valle Central de Cochabamba, las precipitaciones anuales están comprendidas entre 400 a 500 mm. La altura de precipitación media anual en el valle registrada por el Proyecto CABAS durante el período de 1991 a 1994 fue de 470 mm. Este dato coincide con los registros entre 1966 y 1973 (GEBOL - NNUU, 1978) que determinan una precipitación media anual en la parte baja de la cuenca de 432 mm. Sin embargo se puede constatar, especialmente entre los años 1974 y 1991, pronunciadas variaciones pluviométricas (Fig. 7).

El incremento de la precipitación con la altura geográfica se explica por la circulación del aire debido a las variaciones de temperatura entre las partes altas de las estructuras montañosas y bajas de la llanura. Las precipitaciones producidas durante el invierno están relacionadas con el pasaje de frentes y caen casi exclusivamente en las alturas, a veces en forma de nieve; normalmente se trata de pequeñas cantidades.

2.2.2 Temperatura

En el Valle Central de Cochabamba se dispone de datos de temperatura de varios años en 2 estaciones (Tabla 4 y 5). La estación meteorológica Cochabamba (AASANA) se encuentra instalada en el aeropuerto, zona sur de la ciudad de Cochabamba, mientras que la estación de La Tamborada se encuentra en la Facultad de Agronomía a unos 5 km de la ciudad de Cochabamba, sobre el camino que conduce al Valle Alto (Fig. 6)).

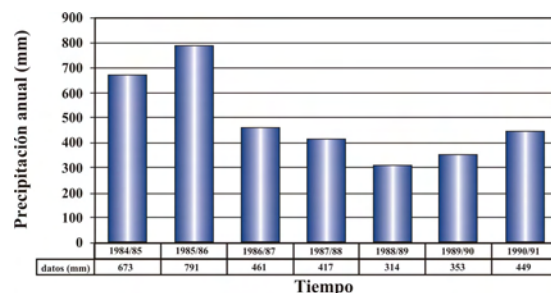


Fig. 7: Precipitación anual en el Valle Central (Fuente: Jordán, 1992) / Annual precipitation in the Central Valley (Source: Jordán, 1992)

The rains in the basin of the Central Valley of Cochabamba are not distributed evenly across the area, but happen as a result of local cloudbursts. The precipitations vary with the altitude and the geographical location from 800 to 1.300 mm per year in sector of the Tunari-Range, whereas in the plain of the Central Valley of Cochabamba, the annual rainfalls vary between 400 to 500 mm. The quantity of annual average precipitation in the valley registered by the CABAS-Project during the period from 1991 to 1994 was of 470 mm. This data matches with the records between 1966 and 1973 (GEBOL - UN, 1978) which give an annual average precipitation in the lower part of the basin of 432 mm. However, pronounced pluviometric variations can be observed, especially during the years 1974 to 1991 (Fig. 7).

The increasing precipitation with geographical elevation is due to advective circulation of the air due to the temperature differences between the top parts of the mountains and the low-lying area of the plain. The rainfalls during winter are related to the passage of fronts and fall almost exclusively in the higher regions, sometimes as snow and normally in small quantities.

2.2.2 Temperature

In the Central Valley of Cochabamba, temperature data of several years from 2 stations are available (Tabla 4 y 5). The meteorological station Cochabamba (AASANA) is installed at the airport, in the southern part of the city of Cochabamba, whereas La Tamborada station is found in the Faculty of Agronomy around 5 kms from the city of Cochabamba, on the road to Valle Alto (the High Valley) (Fig. 6).

Tabla 3: Promedio de temperaturas mensuales en las estaciones manejadas por CABAS para el año 1995. Fuente: CABAS IT N°36, 1997 / Table 5: Monthly average temperatures at the station (°C) operated by CABAS for 1995. Source: CABAS IT N°36, 1997

Estación	Temperaturas promedio mensual (°C)												media
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
Cochab.	18,9	19,2	18,6	18,5	16,5	13,5	13,2	15,9	17,5	20,0	19,2	19,3	17,5
Cocaraya	19,3	19,2	17,9	18,3	16,1	13,5	13,1	15,7	17,6	19,7	18,7	18,6	17,3
Parque T.	14,2	15,0	14,0	14,9	12,9			13,1	14,4	16,7	14,8	15,1	14,5
Viloma	20,0	19,9	20,1	20,8	18,7	16,2	15,4	17,7	18,8	20,9	19,9	19,6	19,0
La Violeta	18,0	17,5	17,9	17,2	15,4	13,2	12,7	15,0	16,8	18,8	18,5	18,9	16,7
Payrumani	17,8	18,7	17,3	18,4	16,9	14,6	13,9	17,1	16,9	19,8	19,0	19,0	17,5
Sarco	21,9	22,2	21,2	21,9	19,9	17,0	16,4	19,0	21,2	22,6	21,8	22,1	20,6
La Tamb.	17,2	17,8	16,5	17,4	14,8	12,4	11,6	14,5	16,1	18,0	16,9	17,5	15,9

Tabla 4 y 5: Promedio de temperaturas mensuales de los años 1980-1992, estación Cochabamba y La Tamborada (AASANA) / Average monthly temperatures in 1980-1992, Cochabamba and La Tamborada (AASANA) station. Source: Development Alternatives Inc. (DAI), Análisis Agro-climático del Departamento de Cochabamba (agroclimatic Analysis climatic of the Department of Cochabamba), 1993

Est. Cochabamba	Temperaturas promedio mensual (°C)													media
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic		
Media	13,5	15,5	17,2	19,3	19,8	20,0	19,0	18,8	18,7	17,8	15,5	13,5	17,4	
Máxima	25,3	26,6	26,9	28,4	28,2	27,4	25,5	25,8	26,3	27,0	26,8	25,1	26,6	
Mínima	1,6	4,4	7,4	10,2	11,5	12,5	12,4	11,9	11,3	8,7	4,3	1,9	8,2	
Est. Tamborada														
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	media	
Media	13,4	15,5	17,2	19,1	19,5	19,1	18,4	18,5	18,4	17,6	15,4	13,5	17,1	
Máxima	24,2	25,3	25,9	27,2	26,9	25,9	24,6	24,9	25,3	25,7	25,6	24,2	25,5	
Mínima	2,7	5,7	8,4	11,0	12,1	12,2	12,2	12,0	11,6	9,4	5,3	2,8	8,8	

La temperatura media anual del Valle Central de Cochabamba es de 17,5 °C, con mínimas extremas de -5 °C y máximas extremas de 34,8 °C.

En algunas de las estaciones pluviométricas, que opera CABAS con otras instituciones, se cuentan con medidas de temperatura media, cuyos registros para el año 1996 se exponen en la Tabla 3.

De manera general y tal como se puede apreciar en Tabla 3, las temperaturas máximas se registran entre los meses de octubre a febrero (verano), en cambio las mínimas ocurren por lo general entre los meses de junio y julio (invierno).

Existe poca variación interanual de las temperaturas medias y se puede indicar una gradiente térmica bas-

The average annual temperature in the Cochabamba valley is 17,5 °C, with a minimum of 5 °C and maximum of 34,8 °C.

In some of the pluviometric stations, operated by CABAS with other institutions, the average temperature is registered. The records for 1996 are exposed in the Tabla 3.

In a general way and as can be seen in Tabla 3, the maximum temperatures are registered during the months of October to February (summer), however the minimums are registered, as a rule, during June and July (winter).

It exists little interannual variation in the average temperatures and high thermal gradient with respect to al-

tante alta con relación a la altura, de aproximadamente 0,85 °C por cada 100 m de altura como promedio anual, presentándose valores algo más bajos en el período de febrero a agosto y superiores en los demás meses.

La variación anual de las temperaturas medias es relativamente pequeña en relación a las fluctuaciones diarias. La temperatura mínima media tiene una marcada oscilación estacional, ya que los cielos despejados y secos durante el invierno permiten una intensa radiación de onda larga, la cual en verano se ve disminuida por la nubosidad y la humedad del aire. Contrariamente, las temperaturas máxima y media acusan poca fluctuación y presentan una alta correlación con la radiación solar que llega a la superficie. La variación máxima extrema en un día llega a aproximadamente 30°C en el mes de junio.

2.2.3 Evapotranspiración potencial

Existen datos de la evapotranspiración de las estaciones Cochabamba y La Tamborada (Fig. 6). En base a la evaluación según Turc se obtiene un promedio de aprox. 1400 mm/año de evapotranspiración potencial y aprox. 490 mm/año de evapotranspiración real.

2.3 Vegetación

En zonas donde existen afloramientos rocosos y el ambiente es seco, la vegetación en el Valle Central es predominantemente de estepa alta y pradera de alta montaña, es decir pastos y arbustos. En zonas topográficamente más bajas se desarrolla una vegetación arbórea-arbustiva semiseca poco más densa. En cambio en la parte central de la cuenca las condiciones del suelo, clima y de la humedad permiten desarrollar todo tipo de cultivos como tubérculos, cereales, hortalizas y muchas variedades de plantas frutales.

2.4 Ambiente hidrográfico

La hidrografía de la cuenca está formada por dos ríos principales que atraviesan la cuenca de este a oeste, los ríos Rocha y Tamborada (Fig. 3). El Río Rocha nace en la cuenca contigua de Sacaba, ingresa al Valle Central por el estrecho de Mesadilla y pasa por la zona urbanizada de la ciudad de Cochabamba. En la parte occidental de la cuenca a la altura de la población de Vinto, el curso del río cambia de norte a sur. El Río Tamborada confluye al Río Rocha a al SE de Quillacollo. Otros ríos que

titude is evident. The gradient consists of approximately 0,85 °C for every difference 100 m (annual average). this average gradient is a little lower between February and August, and slightly higher in the remaining months.

Compared to the daily temperature fluctuations, the annual variations are relatively small. The mean minimum temperature shows marked seasonal variations as a result of the clear, dry skies during the winter that allow an intense long wave radiation to pass through, that during summer is reduced due to clouds and humidity in the air. By contrast, the maximum and average temperatures show little fluctuation. These correlate highly with the solar radiation that reaches the surface. The most extreme daily temperature variation reaches approximately 30 °C in June.

2.2.3 Potential evapotranspiration

Data are available for the evapotranspiration of the stations of Cochabamba and La Tamborada (Fig. 6). An evaluation according to Turc yields an average of approx. 1,400 mm/year of potential evapotranspiration and approx. 490 mm/year of real evapotranspiration.

2.3 Vegetation

In areas with outcrops of rocks and dry atmosphere, the vegetation in the Central Valley is predominantly of high steppe and high mountain prairie (pastures and bushes). In topographically lower areas a little denser semiarid vegetation of trees and bushes is developed. However, in the central part of the basin soil conditions, climate and humidity allow the cultivation of all types of crops including tubers, cereals, vegetables and a wide variety of fruit.

2.4 Hydrographic environment

Two main rivers cross the basin from East to West, the Rocha and Tamborada (Fig. 3). These constitute the hydrography environments of the basin. The Rocha-River springs in the contiguous basin of Sacaba, and flows into the Central Valley through the strait of Mesadilla and passes through the urban areas of the city of Cochabamba. In the western part of the basin, near the village of Vinto, the river changes course towards North-South direction. The Tamborada- River con-

echan sus aguas al Río Rocha, y que nacen en la Cordillera, son los ríos Payrumani, Llave y Tacata. En la parte oeste de la cuenca confluyen los ríos Chaco y Viloma.

Todos los ríos secundarios mencionados anteriormente son de carácter intermitente. Los ríos que bajan de la zona noreste de la cuenca lo hacen en forma de torrenteras que son canalizadas en la zona urbanizada de la ciudad de Cochabamba. El Río Rocha desagua por el sudoeste de la cuenca, echando sus aguas a la cuenca vecina del Río Capinota donde al unirse con el Río Arque forman el Río Caine que posteriormente se convierte en el Río Grande para desembocar por último al Río Amazonas.

2.5 Aguas superficiales

En la zona existe un fuerte control estructural sobre el drenaje. Los ríos principales se ubican sobre fallas longitudinales y en las serranías; los ríos tienen un diseño dendrítico con cierta tendencia centripetal a la cuenca (SEURECA-BRGM-SOGREAH-CGL, 1994).

Por lo general, los cauces de los ríos son irregulares e inestables y es durante la época de lluvias cuando transportan grandes volúmenes de materiales. Algunos ríos son intermitentes y los que tienen régimen permanente, durante el estiaje, transportan caudales muy bajos. En la actualidad, en la época seca raramente las aguas de los ríos secundarios llegan al Río Rocha, ya que las mismas son desviadas para riego o se pierden por evaporación e infiltración.

El Río Rocha atraviesa la ciudad de Cochabamba y se constituye en el principal río que drena las aguas superficiales del Valle Central de Cochabamba. En la actualidad, por lo general, desde el puente de La Muyurina y aguas abajo hasta cerca de Vinto no existe flujo base en la época de estiaje. La poca agua estancada que se observa, proviene de las aguas residuales que son echadas a lo largo del curso del Río Rocha.

Lagunas situadas sobre la Cordillera del Tunari en la parte septentrional del área de estudio, por encima de 3.500 m s.n.m., constituyen fuentes de almacenamiento, en muchos casos artificiales, de las precipitaciones pluviales y en algunas épocas del deshielo de las masas de nieve. Otras lagunas se encuentran como relictos en las partes bajas del Valle Central de Cochabamba, como la Laguna de Alalay (Fig. 3).

verges into the Rocha- River SE of Quillacollo. The Payrumani, Llave and Tacat Rivers also spring from the Cordilleran mountain range and flow into the Rocha- River. In the western part of the basin the Chaco and Viloma rivers join the main stream.

All secondary rivers mentioned above are intermittent in character. The rivers coming down from the northeastern area of the basin are torrential and are canalized in the urbanized zone of the city of Cochabamba. The Rocha- River drains the southwest of the basin, flowing into the adjacent basin of the Capinota River. When joining the Arquer River, together they form the Caine- river that later turns into the Rio Grande and finally empties its waters into the Amazon River.

2.5 Surface waters

In the area, there is a strong structural control on the drainage system. The main rivers are placed along longitudinal faults and in the mountainous areas; the rivers have a dendritic design with a certain centripetal trend towards the basin (SEURECA-BRGM-SOGREAH-CGL, 1994).

As a rule, the riverbeds are irregular and unstable carrying large volumes of materials during the rainy season. Some of the rivers are intermittent and, during the dry season those with permanent volumes experience very reduced flows. Presently, waters of the secondary rivers rarely reach the Rocha- River during the dry season. This occurs because they are diverted for irrigation purposes or diminished by evaporation and infiltration.

The Rocha- River crosses the city of Cochabamba and becomes the main river that drains the superficial waters of the Central Valley of Cochabamba. Currently during the dry season there is no natural flow from La Muyurina bridge downstream until Vinto. The little existing standing water originates from the waste- waters that flow into the Rocha River along its course.

The small lakes situated in the Tunari- Range in the northern part of the study- area (above 3.500 m) often serve as artificial reserves of rainfalls and in some periods of the thawing snow. Other lagoons, like the Alalay- Lake, exist as relicts in the lower parts of the Central Valley of Cochabamba, (Fig. 3).

2.6 Población

El Valle Central de Cochabamba se caracteriza por tener la densidad de población más alta del Departamento. La concentración de población más alta se encuentra en los centros urbanos de las ciudades de Cochabamba con aprox. 600.000 habitantes y Quillacollo con aprox. 50.000 habitantes.

2.7 Demanda de agua potable

La producción, distribución y comercialización de agua potable por parte del Servicio Municipal de Agua Potable y Alcantarillado (SEMAPA) alcanza en la actualidad (06.1999) un caudal de aprox. 740 l/s, de los cuales aprox. 470 l/s provienen de los recursos subterráneos extraídos mediante la explotación de 22 pozos (Información no publicada, SEMAPA).

En base al crecimiento de la población se ha elaborado un balance de la oferta y demanda de agua potable con proyecciones al año 2025 (Dames & Moore, Gerencia de planificación de SEMAPA, 1997), considerando la incorporación de nuevos pozos en las zonas de Vinto y El Paso a partir del año 1998 y la entrada en operación del proyecto Misicuni a partir del año 2001, con lo que dejarían de funcionar los pozos de agua que actualmente son utilizados por SEMAPA. En resumen, según la proyección, en el año 1999 se habrá que contar con un déficit medio de 132 l/s en el abastecimiento de aguas, el cual a partir del 2001 por las aguas adicionales de Misicuni se convertirá en una sobreoferta de aprox. 406 l/s. Sin embargo, el crecimiento poblacional estimado producirá un nuevo déficit a partir del año 2015.

2.8 Abastecimiento de agua

De acuerdo a la información proporcionada por SEMAPA, existen tres sistemas de aguas superficiales que alimentan la red urbana de Cochabamba (Fig. 8).

- (1) El sistema central recoge las aguas de Monte Laguna, Victoriano, Turuni, Escalerani, El Toro y las Chankas.

En la Cordillera del Tunari existe la presa de El Toro con un embalse útil de $1,13 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ de agua, que se comunica con el embalse de Escalerani mediante un torrente natural. Hacia el noroeste de Escalerani existe un canal de tierra con algunos tramos de mampostería con una longitud aproximada de 12 km, denominado "Cuencas Vecinas",

2.6 Population

The Central Valley of Cochabamba has the highest population density of the Department. The highest concentration of population exist in the urban centers of the cities of Cochabamba with approx. 600.000 inhabitants and, in Quillacollo with approx. 50.000 inhabitants.

2.7 Drinking water demand

The production, distribution and commercialization of drinking water by the former Municipal Service of Potable Water and Sewerage (SEMAPA) reaches (06.1999) a flow of approx. 740 l/sec, of which approx. 470 l/sec originate from the groundwater resources extracted through the exploitation of 22 wells (unpublished information, SEMAPA).

Based on projected population growth, an assessment of supply and demand of drinking water has been elaborated with projections until 2025 (Dames & Moore, Management of planning of SEMAPA, 1997). The assessment takes into consideration the installation of new wells in 1998 in the areas of Vinto and El Paso and it also considers the start of the Misicuni- project in 2001. The Misicuni project would end operation of the actual SEMAPA wells. In summary, the projection anticipates a water supply deficit of 132 l/s for 1999 and, from 2001 on, with the additional water volumes from Misicuni, an average water surplus of 406 l/s. The estimated population growth would cause a new deficit from 2015 onwards.

2.8 Water supply

According to information provided by SEMAPA, there are three systems of superficial waters supplying the urban network of Cochabamba (Fig. 8).

- (1) The central system collects the waters from Monte Laguna, Victoriano, Turuni, Escalerani, El Toro and Chankas.

The El Toro dam in the Tunari Cordillera has an available reservoir of $1,13 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ of water. It connects the Escalerani reservoir via a natural torrent. Towards the northwest of Escalerani, there is an earthen channel with sections of masonry of approximate 12 km length called "Cuencas Vecinas" ("Adjacent Basins"). This channel connects

el mismo que une Monte Laguna con Escalerani, recogiendo a lo largo de su curso parte de las aguas de escorrentía, las mismas que se depositan en las presas derivadoras de Monte Laguna, Victoriano y Turuni. La capacidad máxima de este canal es de 2,9 m³/s en su tramo final al llegar a Escalerani. El embalse de Escalerani tiene una capacidad útil de 5,79·10⁶ m³.

De Escalerani sale un canal de aproximadamente 15 km de largo, que va al embalse regulador de La Cumbre. La capacidad del canal es de unos 600 l/s. Las lagunas de Saytu Khocha, Chankas y San Ignacio, que son de propiedad de algunas comunidades agrícolas del Valle Central, tienen comunicación con el canal que va a la Cumbre, lo que permite la compra de agua por parte de SEMAPA, para proveer de agua potable a la ciudad en los meses de mayor estiaje. Del embalse regulador de La Cumbre sale un canal de aproximadamente 1.000 m de largo que lleva un caudal de aproximadamente 300 l/s hacia el Río Tolapujro a una altura de 4.050 m. La toma de estas aguas se ubica a un nivel 1.100 m más abajo produce grandes pérdidas.

- (2) Hacia el este del anterior sistema, en la misma Cordillera, se encuentran la laguna de San Pablo que se comunica con la laguna de San Juan, de donde sale un canal de tierra de aproximadamente 7 km de longitud, que comprende un tramo de unos 750 m de túnel, actualmente parcialmente derrumbado, que lleva un caudal de unos 45 l/s y lo vierte en los ríos Andrade y Chaqui Mayo, de los cuales se recupera más abajo, para consumo humano, en un caudal aproximado de 14 l/s.
- (3) Hacia el este del canal que sale de la laguna San Juan, se encuentra la laguna de Wara Wara, cuya presa ha sido recientemente reconstruida, y que mediante un pequeño canal vierte sus aguas a la quebrada de Chuncara, siendo posteriormente recuperados entre 10 y 12 l/s mediante una galería de infiltración en la misma quebrada.

Según cálculos estimativos el caudal de agua superficial que normalmente llega al Valle Central, de los tres sistemas mencionados, es de 360 l/s de un total de 500 l/s que son producidos en la Cordillera, con un porcentaje de pérdidas estimadas en un 30 % (SEURECA–BRGM–SOGREAH–CGL, 1994).

Monte Laguna with Escalerani and, receives runoff water from Monte Laguna, Victoriano and Turuni - all smaller dams. The channel reaches its maximum capacity of 2,9 m³/s in its final stretch when reaching Escalerani. The Escalerani reservoir has a usable capacity of 5,79·10⁶ m³.

An approx. 15 km long channel stretches out from Escalerani and La Cumbre, a regulating reservoir. The channel has a capacity of about 600 l/s and it is linked with the Saytu Khocha, Chankas and San Ignacio lakes. These links allow SEMAPA to buy drinking water from the lakes, for the city during the driest months of the year. The lakes belong to some agricultural communities of the Central Valley. There is another channel that collects water from superficial sources. It flows from the La Cumbre reservoir, and extends for approx. 1,000 m towards the Tolapujro River at an elevation of 4,500 m. The waters of this channel have a flow of approx. 300 l/s and, they are collected at altitudes of 3,400 m with large losses of water

- (2) East of the system previously described and in the same mountain range, lies the San Pablo lake, that connects to the San Juan Lake. An earthen channel of approximately 7 kms length (including a stretch with a 750 m long tunnel, at present partially destroyed), emerges from these lakes with a flow of about 45 l/s. The channel empties in the Andrade and Chaqui Mayo Rivers, further downstream, an approximate flow of 14 l/sec is recovered for human consumption.
- (3) East of the channel that leaves the San Juan Lake lies the Wara Wara lake, whose dam has been recently reconstructed. This dam pours its waters through a small channel into the valley of Chuncara; where between 10 and 12 l/s are recovered by a gallery of infiltration further down in the valley.

According to estimates, the flow rate of surface water reaching the Central Valley from the three systems described above, is about 360 l/s. The total water coming down from the Cordillera into the basin is about 500 l/s. The disparity between these figures implies losses of 30% (SEURECA - BRGM - SOGREAH - CGL, 1994).

Existen otras lagunas en la Cordillera, que son de propiedad privada y que mayormente se utilizan para fines de riego de los terrenos de comunidades campesinas.

Other lakes in the Cordillera are of private property and are used mostly for irrigation by rural communities.

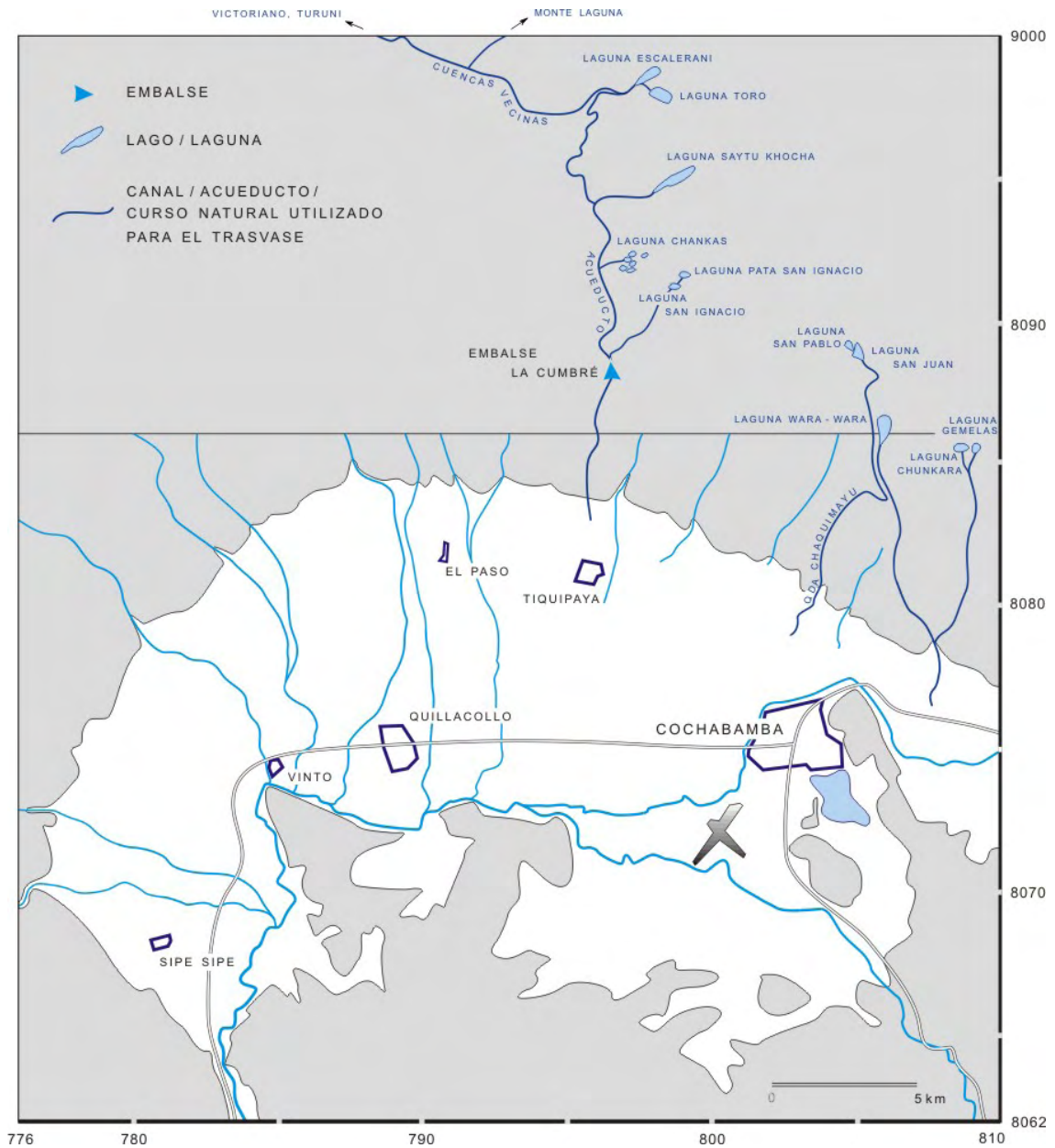


Fig. 8: Los sistemas de captación de aguas superficiales para el abastecimiento de agua de Cochabamba / The collecting systems of superficial waters for the water supply of Cochabamba.

Otro sistema, que aporta sus aguas a la cuenca del Valle Central, es el del embalse de La Angostura que represa las aguas del Valle Alto, con una capacidad de $85 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ de agua y que es transportada a través de un canal y el curso del Río Tamborada, para su posterior toma y distribución, para riego, mediante dos canales que circulan uno al norte y el otro al sud de la llanura del Valle Central de Cochabamba. El caudal de las aguas que salen de la Angostura normalmente alcanza 2.000 a 3.000 l/s, durante un periodo de 9 a 10 meses por año, pero presenta un 45 % de pérdidas en su trayecto (Fig. 8).

3 GEOLOGIA

En la *Monografía del Departamento de Cochabamba* de Urquidi (1954) se indica que los primeros estudios geológicos y los más valiosos del Departamento de Cochabamba son los del insigne naturalista francés Alcides d'Orbigny, cuya gran obra "Voyage dans l'Amérique Meridionale" trata de la Geología del territorio boliviano en los capítulos IX, X y XI, correspondientes a la última parte del 3er tomo.

La situación geológica general está descrita por Jordan (1967). Vale mencionar también los comentarios de Hoeck & Steinmann (1906), Troll (1929) y Ahlfeld (1970, 1972). Estos autores llegan a la conclusión de que el Valle es un graben tectónico, limitado por fallas normales en el norte y en el sud y por fallas inversas en el oeste. El relleno sedimentario no está diferenciado en estos trabajos. Solamente es destacado que las generaciones de abanicos aluviales están relacionados con períodos tectónicos.

Dentro del programa del Proyecto CABAS se realizó el estudio geológico detallado de los sedimentos plio-cuaternarios de la cuenca de Cochabamba (Veit, 1992).

3.1 Geomorfología

En el Valle Central de Cochabamba se distinguen tres zonas morfológicas diferenciadas por su altura topográfica y su relieve:

(1) **La zona montañosa** que comprende las cordilleras

La Angostura reservoir is another system that provides water to the basin of the Central Valley. the reservoir dams waters of the Valle Alto (High Valley) and has a capacity of $85 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ of water. Its waters flow through a channel to the Tamborada river, where they are extracted and distributed for irrigation purposes via two channels. One of these circulates in the north and the other one flows in the south of the plain of the Central Valley. The flow rate of the waters at the Angostura strait normally reaches 2,000 to 3,000 l/s during a period of 9 at 10 months per year. However, these are subject to a 45 % loss along their course (Fig. 8).

GEOLOGY

The *Monografía del Departamento de Cochabamba* (Monograph of the Department of Cochabamba) by Urquidi (1954) indicates that the first and most valuable geological studies of the Cochabamba Department are those of the French naturalist Alcides d'Orbigny. His most important work "Voyage dans l'Amérique Meridionale" (A Voyage through South America) treats about the Geology of the Bolivian territory in the chapters IX, X and XI, corresponding to the last part of the third volume.

Jordan (1967) describes the general geological situation. Hoeck & Steinmann (1906), Troll (1929) and Ahlfeld (1970, 1972) also make worthwhile observations. These authors conclude that the Valley is a tectonic graben, which is limited by normal faults to the north and south, and by reverse faults in the west. The sedimentary filling is not differentiated in these papers. It is only emphasized that the generations of alluvial cones are related with tectonic periods.

A detailed geological study of the Pliocene- Quaternary sediments of the Cochabamba Valleys was carried out as part CABAS project (Veit, 1992).

3.1 Geomorphology

There are three morphologically distinct zones in the Central Valley of Cochabamba. Each is distinguishable by its particular topographical elevation and relief:

(1) **The mountainous zone:** This area includes the

del Tunari y Mazo Cruz que circundan la cuenca hacia el norte y oeste respectivamente, cuyas alturas llegan hasta más de los 5.000 m s.n.m.. El punto de mayor altura es el Pico Tunari con 5.030 m s.n.m.. También en esta zona se incluyen las serranías que bordean la cuenca hacia el sud y el sudeste con alturas hasta de 3.200 m s.n.m., que definen la divisoria de aguas con las cuencas vecinas de Santivañez y Sacaba (Fig. 4).

La zona de montaña se encuentra sujeta a procesos de meteorización y consecuente erosión por la acción de los cambios de temperatura, las precipitaciones y la glaciación en las partes más elevadas. Estos procesos dan lugar a la producción de detritos que por la diferencia de altura son arrastrados por los torrentes y depositados en la parte baja de la cuenca. También son frecuentes los depósitos coluvio-aluviales y debido al alto radiante son comunes los derrumbes y deslizamientos.

En la geomorfología de la zona montañosa resaltan las formas modeladas por las glaciaciones de alta montaña que han dejado rasgos típicos como son los valles, lagunas y circos glaciales (Fig. 9), además de los depósitos morrénicos. A medida que se desciende a la planicie se encuentran cinturones de pedimentos desarrollados por la fuerte meteorización y erosión de las rocas paleozoicas.

En la zona montañosa, que circunda la cuenca fluvio-lacustre, existen varias lagunas, la mayoría de las cuales son de origen glacial (Fig. 9).

En la misma zona, el avenamiento superficial es de diseño dendrítico y en su conjunto los ríos se disponen en forma radial hacia la parte central de la cuenca, reflejando el control estructural y topográfico al cual están sometidos.

(2) La zona de talud y de piedemonte, formada por depósitos torrentosos que forman conos y abanicos que se interconectan y constituyen la llanura aluvial que bordea la cordillera principalmente en el área septentrional del valle (Fig. 2).

En esta zona se presentan abanicos aluviales de diferente edad. Los más antiguos están al borde de la cordillera, mayormente son de origen glacial y en algunos casos se originan en derrumbes de grandes bloques. En general son materiales gruesos de alta permeabilidad hidráulica.

Los abanicos más recientes se extienden hacia el Río Rocha, presentan una menor pendiente y suelos poco desarrollados, siendo su origen eminentemente aluvial. Todos los abanicos presentan una gradación en el

Tunari and Mazo Cruz mountain ranges which surround the basin in the north and west respectively. Their elevations reach heights of more than 5.000 m above sea level. The Tunari Peak is the highest elevation, rising 5.030 m above sea level. Included in this area are hilly areas that surround the basin towards the south and the southeast with elevations of up to 3.200 m. These hills define the divide with the adjacent basins of Santivañez and Sacaba (Fig. 4).

The mountainous zone is subject to processes of weathering and erosion caused temperature fluctuations, rainfalls and the glaciation in the highest parts. These processes form detritus that is swept down by torrents and later deposited in the lower part of the basin. Colluvio- alluvial deposits are frequent and, due to the high gradient, collapses and landslides are common.

Landforms shaped by the high mountain glaciation include features as the shape of the valleys, the small lakes, glacial cirques (Fig. 9) and moraine deposits. Together, these landforms constitute the main geomorphological features of the mountainous zone. Belts of pediments formed by strong weathering and erosion of the Paleozoic rocks can be found descending towards the plain.

Surrounding the fluvio lacustrine basin, there are several lagoons, most of them are of glacial origin (Fig. 9).

The superficial drainage system in this same area is of dendritic design. Its rivers, in their ensemble, flow radially towards the central part of the basin, reflecting the structural and topographical control that they are submitted to.

(2) The zone of slope and piedmont: This zone is formed by torrential deposits that form cones and fans. These are interconnected and form the alluvial plain that borders the range that is mostly located in the northern area of the valley (Fig. 2).

In this area, there alluvial cones of different ages. The oldest are at the edge of the range and, are mostly of glacial origin. Some of these originated from collapses of big blocks. In general, they are composed of coarse-grained materials of high hydraulic permeability.

The most recent fans extend towards the Rocha River, with smaller slopes and little developed soils, having a clearly alluvial origin. All the fans exhibit gradations in grain size following a general rule: their grains are

tamaño de grano, siendo más grueso hacia la cordillera y más fino a medida que se acercan al Río Rocha. Los abanicos antiguos presentan cañadones que son cortados por los torrentes de los más jóvenes.

(3) La zona de llanura, formada por depósitos fluvio-lacustres con predominancia de materiales finos que se ubican en la parte central de la cuenca. En la llanura se distinguen las dos siguientes unidades morfológicas:

- La llanura propiamente dicha, sobre la que se ubican las principales poblaciones incluyendo la ciudad de Cochabamba.

- La zona baja, ubicada en el sector sud de la cuenca, presenta zonas pantanosas y en algunos casos eflorescencias salinas.

coarser near the range and, gradually become finer approaching the Rocha River. The older fans have gorges forged by the younger torrents.

(3) The zone of the plain: This zone is formed by fluvio lacustrine deposits with predominance of fine materials located in the central part of the basin. The area is divide into two morphological units:

- The properly called plain. The plain harbors the largest populations including the city of Cochabamba.

- The second regions is called the low area. It contains swampy areas in the southern sector of the basin and a few salt efflorescences.

3.2 *Estratigrafía del Paleozoico hasta el Terciario; mapa geológico / Stratigraphy of the Paleozoic to the Tertiary; geological map*

La totalidad de los afloramientos del área de estudio son rocas de origen sedimentario, que pertenecen a sistemas de la era paleozoica, mesozoica y cenozoica. Con excepción de los depósitos cuaternarios, las rocas han sido afectadas por numerosos plegamientos (Mapa 1).

All outcrops of the study area are rocks of sedimentary origin, belonging to systems of the Paleozoic Mesozoic and Cenozoic era. Excluding the quaternary deposits, these rocks have been affected by numerous foldings (Map 1).



Fig. 9: Lagunas de origen glacial que abastecen a la ciudad de Cochabamba / Lagoons of glacial origin that supply the city of Cochabamba

La cuenca hidrográfica del Valle Central se encuentra implantada en el flanco sur de la Cordillera del Tunari que es un brazo de la Cordillera Oriental de los Andes Centrales. Se caracteriza por un diastrofismo intenso relacionado especialmente al ciclo orogénico andino. Las estructuras montañosas, de dirección noroeste – sudeste, están constituidas principalmente por rocas del sistema ordovícico y silúrico (lutitas, limolitas, areniscas, cuarcitas y filitas), observándose además en la parte occidental y sur-occidental del área afloramientos pérmicos y cretácicos (arcillas, areniscas, margas, calizas) y también conglomerados terciarios (Mapa 1).

Las rocas paleozoicas se hallan extensamente distribuidas en el área, son de origen marino principalmente areniscas, cuarcitas limonitas y lutitas plegadas.

El Valle Central es producto de una depresión tectónica donde se han depositado cantidades considerables de sedimentos terciarios y cuaternarios. Gran parte de estos depósitos se acumularon en un ambiente lacustre o fluviolacustre, debido a la ausencia de un drenaje permanente, formándose así la parte central plana. Al pie de las montañas y serranías se han formado abanicos aluviales que bordean la llanura (Fig. 2, Mapa 1).

Debido a la importancia para el aprovechamiento de sus aguas subterráneas que tienen los sedimentos del sistema cuaternario del Valle de Cochabamba, el Proyecto CABAS realizó un estudio detallado de este sistema.

En el mapa geológico se representan los períodos geológicos, sin diferenciar las unidades sedimentarias. Para información geológica mas detallada se hace referencia a Ballón-Ayllón et al. (1997). En lo que sigue, solo se da una breve descripción de las unidades que afloran en el área representado por el mapa.

3.2.1 Sistema ordovícico (O)

La base de este sistema no aflora dentro de la zona y solo se encuentra representado por su serie superior correspondiente al Caradociano.

Las rocas de edad ordovícica se encuentran ampliamente desarrolladas en la parte septentrional del Valle Central (Cordillera del Tunari), así como al sud (norte de Santivañez y sudeste de la Laguna Alalay). En este sistema se encuentran fósiles como línulas, trilobites y crucianas. El Ordovícico en la hoja (Mapa 1) está representado por las siguientes formaciones:

The hydrographic basin of the Central Valley is embedded in the southern flank of the Tunari- Range, an arm of the Eastern Cordillera of the Central Andes. It is characterized by an intense diastrophism related especially to the Andean orogenic cycle. The mountainous structures, of northwestern- southeastern direction are mostly made up by rocks of the Ordovician and Silurian systems (mudstones, shales, sandstones, quartzites and phyllites). In the western and southwestern part of the area, there are Permian and Cretaceous outcrops (clays, sandstone, marls, limestones) as well as Tertiary conglomerates (Map 1).

The Paleozoic rocks are widely distributed throughout the area; they are of marine origin and consist of mostly sandstone, quartzitic siltstones and folded shales.

The Central Valley is the result of a tectonic depression in which considerable quantities of Tertiary and Quaternary sediments have been deposited. Due to the absence of a permanent drainage system, many of these deposits were accumulated in a lacustrine or fluviolacustrine environments; the flat central part of the valley has been formed like this. Alluvial cones bordering the plain can be found at the foot of mountainous areas (Fig. 2, Map 1).

Due to their importance as a groundwater reservoir, the sediments of the quaternary system of the Valley of Cochabamba was subjected to a detailed investigation, carried out by the CABAS project.

In the geological map the geological periods are presented, without differentiation of the sedimentary units. For more detailed geological information please refer to Ballón-Ayllón et al. (1997). The following report only provides a short description of the outcropping units found in the area represented in the map.

3.2.1 Ordovician (O)

The base of this system does not form outcrops in the area and, is only represented by its upper series corresponding to the Caradocian.

The Ordovician rocks are widely developed in the northern part of the Central Valley (Tunari- Range), as well as south of it (north of Santivañez and southeast of the Alalay lake). This system contains fossils like línulas, trilobites and crucianas. In the mapsheet (Map 1), the Ordovician is divided the following formations:

Formación Capinota

Se presenta en la base del Ordovícico que aflora en la zona y se compone de lutitas de color gris oscuro intercaladas con limolitas gris verdosas y hacia el tope con delgados bancos de areniscas que contienen geódas fosilíferas.

Formación Anzaldo

Ocupa la mayor parte de la cordillera al norte, oeste y sur del valle. Está conformada por limolitas gris verdosas intercaladas con areniscas duras y compactas del mismo color que se alteran a marrón claro, de grano medio a grueso.

Formación San Benito

En su parte inferior se encuentran areniscas cuarcíticas, de grano fino a medio, bien estratificadas, blancas con tonos rojizos. Pasan hacia arriba a areniscas cuarcíticas micáceas de color gris blanquecino con tonos oscuros.

3.2.2 Sistema silúrico (S)

El sistema silúrico, se halla representado en la zona por afloramientos de las formaciones Cancañiri y Uncía. Esta última tiene escasa distribución en el área.

Por lo general los afloramientos de este sistema se encuentran en el núcleo de los sinclinales, suprayacentes al Ordovícico en forma aparentemente concordante.

Uno de los afloramientos (sector sudeste del área de estudio), se extiende al oeste de la Laguna Alalay pasando por Uspa Uspa hasta llegar a la Laguna Angostura. El otro afloramiento de menor extensión, se encuentra en el sector nor-central de la cuenca (Mapa 1).

Capinota- Formation

It represents the base of the outcropping Ordovician in the area. It is composed of dark gray shales intercalated with greenish gray siltstones. Towards its top it has thin banks of sandstone that contains fossiliferous geodes.

Anzaldo- Formation

Covers most of the Cordillera to the north, west and south of the valley. It is formed by greenish- gray shales inserted with hard, compact, middle to coarse-grained sandstone of the same color altering to a light brown color

San Benito- Formation

In its lower part it consists of well stratified, white and reddish quartzitic sandstone of fine to middle-sized grains. They change upwards into mica-rich quartzitic sandstone of whitish grey color with dark overtones.

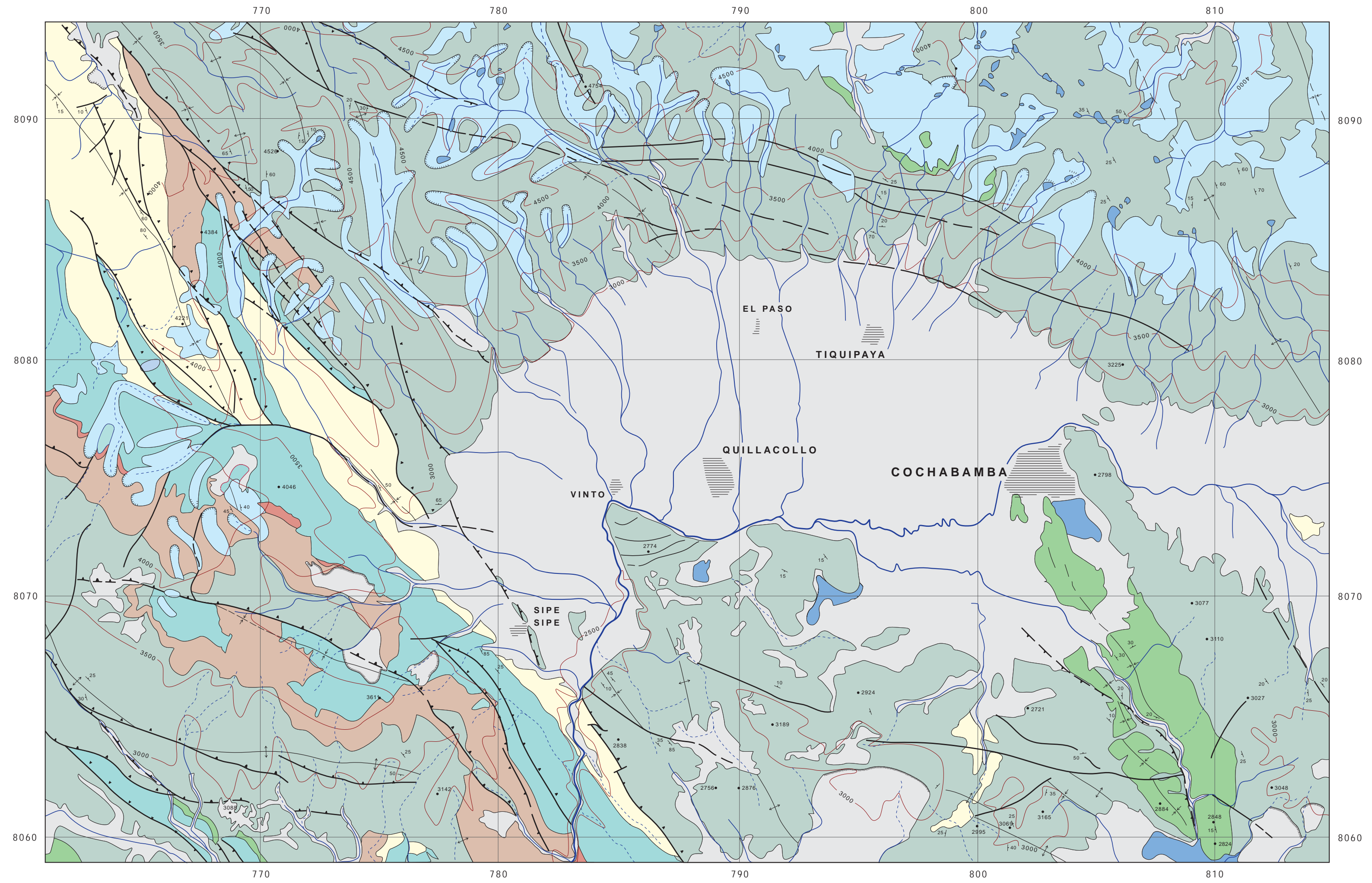
3.2.2 Silurian (S)

The Silurian in the area, consists of outcrops of the Cancañiri and Uncía formations. This last one has scarce distribution in the area.

The outcrops of this system are usually found in the cores of the synclines, overlying the Ordovician in an apparently concordant manner.

One of the outcrops (in the southeastern sector of the study- area), extends in the west of the Alalay Lake striking along Uspa Uspa to the Angostura Lake. The other outcrop of minor extension is in the north- central sector of the basin (Map 1).

MAPA GEOLÓGICO VALLE CENTRAL DE COCHABAMBA



	CUATERNARIO FLUVIAL Y LACUSTRE
	CUATERNARIO GLACIAL
	SISTEMA TERCIARIO
	SISTEMA CRETACICO
	SISTEMA PERMICO
	SISTEMA DEVONICO
	SISTEMA SILURICO
	SISTEMA ORDOVICICO

SIMBOLOS TOPOGRAFICOS

	RIO PERMANENTE
	RIO INTERMITENTE
	LAGO, LAGUNA
	CURVA DE NIVEL (INTERVALOS DE 500m)

SIMBOLOS GEOLOGICOS

	FALLA NORMAL
	FALLA INVERSA
	FALLA APROXIMADA O INFERIDA (NORMAL O INVERSA)
	EJES ANTICLINALES
	EJES SINCLINALES
	DESGLIZAMIENTO / CIRCO GLACIAL
	ELEVACIONES PRINCIPALES O COTAS
	DIRECCION DE RUMBO Y BUZAMIENTO

ESCALA: APROX. 1 : 145 000

Formación Cancañiri (Scc)

Esta formación se constituye en un horizonte guía para definir el límite con los estratos ordovícicos, por su carácter distinguible debido a su contenido apreciable de hierro, pudiendo encontrarse también estaño y antimonio. Está compuesto por sedimentos glacial marinos "clay grits" (con clastos principalmente de cuarzo), de color gris pardusco en superficie fresca y marrón rojizo en alterada. Se intercalan esporádicamente con areniscas cuarcíticas y limolitas de color gris oscuro.

Formación Uncía (Sun)

Se encuentra compuesta por lutitas friables, de color gris oscuro en superficie fresca y marrón con tonos rojizos en alterada, exfoliación de hojas y estratificación laminar, con alto contenido de mica en los planos de estratificación, con esporádicos horizontes de areniscas y limolitas de color verde olivo.

Formación Catavi (Sct)

Son areniscas micáceas de color gris verdusco intercaladas con horizontes de lutitas.

3.2.3 Sistema devónico (D)

Afloramientos devónicos se encuentran en forma de un cinturón en el núcleo de algunos sinclinales. Aflora mayormente en la parte occidental de la hoja. En estos afloramientos se han reconocido las siguientes formaciones (Mapa 1):

Formación Santa Rosa

Compuesta por areniscas bien estratificadas, de color gris blanquecino, intercaladas con escasos niveles de lutitas. Son frecuentes los horizontes con marcas de oleaje y estratificación cruzada.

Formación Icla

En la base se presentan lutitas en parte arenosas y limolitas gris oscuras; luego siguen lutitas de color gris verdusco en superficie fresca y gris amarillento en alterada, intercaladas por unos pocos bancos delgados de areniscas de grano fino a medio del mismo color.

Formación Huamampampa

En el núcleo de algunos sinclinales, descansando concordantemente sobre la formación Icla, se encuentra el Huamampampa, compuesto por areniscas blanquecinas, en partes con estratificación cruzada intercaladas con bancos delgados de lutitas.

Cancañiri- Formation (Scc)

This formation forms a guide horizon to define the limit with the Ordovician strata. It has noticeable iron contents, as well as tin and antimony. It is composed of glacial marine sediments "clay grits" (with clasts mostly of quartz), of greyish- brown color in fresh surface and reddish- brown on altered surfaces. They are inserted sporadically with quartzitic sandstones and shales of dark grey color.

Uncía- Formation (Sun)

It is composed by friable shales, of dark grey color in fresh surface and brown with reddish tones being altered. The formation also contains exfoliation and laminar stratification, with high contents of mica in the stratification planes. It has as well sporadic horizons of olive- green sandstone and shales.

Catavi- Formation (Sct)

It has mica rich greenish grey sandstones which are intercalated with horizons of shales.

3.2.3 Devonian (D)

Devonian outcrops can be found in the cores of some synclines, where they appear in the shape of a belt. They exist in the western part of the mapsheet. In these outcrops following formations have been recognized (Map 1):

Santa Rosa- Formation:

Composed by good stratified whitish- grey sandstone, inserted with scarce levels of shales. Horizons with swell-marks and crossbedding are frequent.

Icla- Formation

At its base partially sandy and dark grey mudstones and shales are present. Followed by shales, which are greenish grey in fresh surface and yellowish grey being altered, intercalated by a few thin layers of fine to middle grained sandstone of the same color.

Huamampampa- Formation

In the core of some synclines, resting concordantly on the Icla- Formation, the Huamampampa-Formation is found,. It consists of whitish, partly cross-bedded sandstones and is inserted with thin banks of shales.

3.2.4 Sistema pérmico (P)

El sistema pérmico no tiene mucha difusión en el área estudiada. Se conocen afloramientos pertenecientes a la formación Copacabana entre los cinturones del Devónico y Cretácico en el oeste de la hoja (Mapa 1).

Formación Copacabana

Esta formación está compuesta por calizas de color gris claro intercaladas con lutitas carbonosas.

3.2.5 Sistema cretácico (K)

Las rocas cretácicas están constituidas por arcillas, margas y areniscas calcáreas. Afloramientos pertenecientes a este sistema están desarrollados en una ancha faja en el sector occidental (Mapa 1). Comprende las siguientes formaciones:

Formación Toro Toro

Presenta un conglomerado basal polimíctico de color pardo rojizo con matrix arcillosa, superpuesto por areniscas limosas y limolitas rojizas.

Formación El Molino

Esta formación sobreyace en forma discordante las rocas del sistema ordovícico. En la base presenta areniscas calcáreas gris amarillentas de grano medio a grueso, intercaladas con arcillas y margas multicolores. Luego continúan calizas oolíticas fosilíferas, duras, compactas, de color gris-blanquecino y calizas muy duras de color gris oscuro.

3.2.6 Sistema terciario (T)

Las rocas que pertenecen al Terciario afloran en la parte occidental del Valle de Cochabamba y su litología está constituida por conglomerados y arcillas de color rojizo de permeabilidad baja a media. Este sistema se encuentra representado por las siguientes formaciones, entre las cuales la formación Sta. Lucía y Morochata forman los afloramientos más importantes.

Formación Santa Lucía

Está conformada por arcillas rojizas y margas poco consolidadas de coloración marrón verdosa, intercaladas en su parte media con areniscas calcáreas de color amarillo rojizo y limolitas. La parte superior de esta formación, contiene arcillas y margas que presentan vetillas de yeso fibroso marrón violáceo y marrón verdoso.

3.2.4 Permian (P)

The Permian system does not extent much in the studied area. Outcrops of the Copacabana- Formation are known between the belts of the Devonian and Cretaceous in the west of the mapsheet (Map 1).

Copacabacana- Formation

Limestones of light grey color intercalated with calcareous mudstones compose this formation.

3.2.5 Cretaceous (K)

The Cretaceous rocks consist of clays, marls and calcareous sandstone. Outcrops belonging to this system are developed in a wide band in the western sector (Map 1). The system includes the following formations:

Toro Toro- Formation

This is a reddish brown basal polymictic conglomerate with a clayey matrix. It is overlain by shaly sandstones and reddish shales.

El Molino Formation

This formation overlies the rocks of the Ordovician in a discordant manner. At the base, it presents middle to coarse- grained yellowish- grey calcareous sandstones, that are intercalated with clays and multi- colored marls. Upwards the sequence continues with hard, compact, whitish grey fossiliferous oolitic limestones, as well as very hard dark grey limestones.

3.2.6 Tertiary (T)

The rocks that belong to the Tertiary crop out in the western part of the Valley of Cochabamba and their lithology consists of conglomerates and clays of reddish color with low to middle permeability. This system is represented by the following formations, with the Sta. Lucia and Morochata formations producing the most important outcrops

Santa Lucía- Formation

It is formed by reddish clays and little consolidated marls of greenish brown coloring, intercalated in its middle part with calcareous reddish yellow sandstone and siltstones. The top of this formation contains clays and marls that have veinlets of violet brown and greenish- brown fibrous gypsum.

Formación Morochata

Está formada por un conglomerado de tipo polimítico, con matrix areno-arcillosa, de coloración rojiza y areniscas arcillosas intercaladas con delgadas capas de tobas blancuzcas o rosadas en la base. En la zona se puede observar el acuñamiento debido a la falla Sipe-Sipe.

Formación Parotani

Está constituida por conglomerados, arcillas rojas, margas yesíferas con intercalaciones de tobas.

Formación Sacaba

Son arenas y arcillas gris verdosas con niveles de tobas. En forma reducida algunos afloramientos están ubicados al sur del aeropuerto de Cochabamba.

3.3 El Cuaternario (Q) en el Valle Central

Entre las formaciones cuaternarias representadas en el mapa geológico (Mapa 1), se diferencia únicamente entre las formaciones glaciales ubicadas mayormente en la cordillera al norte del valle por un lado y las formaciones fluviales, fluviolacustres y lacustres yacientes en el mismo valle o en los lechos de los ríos por el otro. En lo que sigue se discutirá detalladamente las formaciones cuaternarias en base a un mapa sedimentológico (Mapa 2):

En el marco del Proyecto PIRHC (GEBOL - NNUU, 1978) se efectuó un estudio geológico en la cuenca del Valle Central en el cual se analizó las edades y la distribución vertical y lateral de los sedimentos del Valle Central. El esquema geológico de la cuenca de Cochabamba elaborado por el PIRHC (Fig. 10) resulta ser válido hasta el día de hoy.

El Valle Central de Cochabamba muestra un amplio desarrollo de materiales cuaternarios. Se trata de materiales lacustres y fluviolacustres, que rellenaron la fosa tectónica a finales del Plioceno y durante el Pleistoceno.

Los sedimentos cuaternarios se hallan distribuidos en toda la parte central de la cuenca del Valle de Cochabamba. Su origen se debe a la deposición de los materiales transportados tanto por los glaciales como por los ríos que descienden de las partes altas hacia los lagos que cubrían la cuenca del Valle de Cochabamba.

El relleno cuaternario de la cuenca es complejo y está constituido por depósitos de una gran variedad litológica, desde bloques y pedrones a limos y arcillas,

Morochata- Formation

It is formed by a polymictic-type conglomerate, with a reddish sandy-clayey matrix, and clayey sandstones inserted with thin layers of whitish or whitish-pink tuffs at the base. In the area, there is a wedging due to the activity of the Sipe Sipe-fault.

Parotani- Formation

It consists of conglomerates, red clays, gypsum-rich marls with intercalations of tuffs.

Sacaba- Formation

It is made up of sands and greenish grey clays with levels of tuffs. Small number outcrops are found south of the airport of Cochabamba.

3.3 The Quaternary (Q) in the Central Valley

The quaternary formations represented in the geological map (Map 1) are differentiated only into glacial formations, mainly located in the mountain range in the north of the valley, and the fluvial, fluviolacustrine and lacustrine formations in the valley itself or in the river beds. In the following the quaternary formations will be discussed in detail, based on a sedimentological map (Map 2):

A geological study was carried out in the basin of the Central Valley within the framework of the Project PIRHC (GEOBOL - UN, 1978), in which the ages and the vertical and lateral distribution of the sediments was analyzed. The geological scheme of the basin of Cochabamba elaborated by the PIRHC (Fig. 10) continues to be valid today.

The Central Valley of Cochabamba contains a wide development of quaternary materials. It is made up of lacustrine and fluviolacustrine materials which, filled the tectonic basin at the end of the Pliocene and during the Pleistocene.

The quaternary sediments are distributed in all of central part of the basin of the Cochabamba Valley. Their origin in the deposition of the materials transported by glaciers and rivers that descended from the high parts towards the lakes which once covered the basin of the Cochabamba Valley .

The quaternary filling of the basin is complex. It is made up of deposits that have a large lithological variety. They range from blocks and boulders to muds and

disminuyendo el tamaño de grano progresivamente desde la parte alta de los abanicos aluviales hasta la parte central de la depresión.

Existen numerosos pozos que confirman la existencia de materiales heterogéneos tanto en sentido vertical como lateral, sobre todo debido a la sedimentación tumultuosa y caótica originada en las variaciones de nivel lagunar como en el frecuente cambio de cauce de los ríos.

El Proyecto CABAS por su parte, a través de Veit (1992), ha impulsado la investigación del origen de los sedimentos no consolidados en el valle. Mediante un estudio glaciológico en la cordillera se ha establecido una correlación entre sedimentos fluviales del valle con sedimentos glaciales de la cordillera. Para cartografiar la distribución superficial de los sedimentos cuaternarios se interpretaron imágenes de satélite Landsat, Thematic Mapper en escalas 1:250.000, 1:100.000 y 1:50.000. Los detalles menores se interpretaron en fotografías aéreas de la zona a una escala aproximada de 1:60.000. La verificación e interpretación de las unidades cartografiadas y el estudio de cortes geológicos en quebradas han sido realizadas en el campo.

3.3.1 Sedimentos superficiales en el Valle de Cochabamba: mapeo sedimentológico

Los sedimentos superficiales están distribuidos de acuerdo al detalle del Mapa Geológico del Cuaternario (Mapa 2). Se caracterizan por tener diferencias en edad, composición y origen. La granulometría desde el flanco sur de la Cordillera del Tunari hacia el Río Rocha cambia de grueso a fino. En la cordillera existen depósitos glaciares y al borde sur abanicos y derrumbes. El centro del valle está caracterizado por sedimentos finos de origen fluvio-lacustre.

El texto se referirá a las unidades indicados en el Mapa 2 usando números de acuerdo al siguiente orden:

- 1 Morrenas (Choqueyapu II)
- 2 Morrenas (Choqueyapu I)
- 3 Abanico con bloques (Pleistoceno)
- 4 Abanico con bloques (Holoceno Sup.)
- 5 Abanico con grava y arena (Holoceno Sup.)
- 6 Abanico con grava, arena y limo (Holoceno inf. a medio)
- 7 Abanico con arena, limo y gravas (Holoceno inf. a medio)
- 8 Abanico con limo, arcilla y arena (Holoceno inf. a medio)
- 9 Sedimentos del Río Rocha (Holoceno)
- 10 Derrumbe

clays. The grain size progressively decreases from the higher part of the alluvial cones towards the central part of the depression.

There are numerous wells that confirm the existence of heterogeneous materials as much in vertical as lateral sense. This is mostly due to the tumultuous and chaotic nature of sedimentation originated in the fluctuations in the lakes water level as well as in the frequent changes of the river beds.

The CABAS Project for its part, with the study of Veit (1992) has thrown new light on the origin of the non-consolidated sediments in the valley. A glaciological study in the Cordillera has established a correlation between fluvial sediments of the valley and glacial sediments of the range. To map the superficial distribution of the quaternary sediments satellite images Landsat, Thematic Mapper in scales of 1:250.000, 1:100.000 and 1:50.000 were interpreted. The smaller details were garnered from aerial photographs of the area with an approximate scale of 1:60.000. The verification and interpretation of the mapped units and the study of geological sections along the valleys have been carried out in the field.

3.3.1 Superficial sediments in the Valley of Cochabamba: sedimentological mapping.

The superficial sediments are distributed as shown on the sedimentological map (Map 2). The units are characterized by differences in age, composition and origin. The granulometry changes from coarse to fine starting at the southern flank of the Tunari- Range and heading towards the Rocha- River. There are glacial deposits in the range and along the southern edge, there are fans and landslides. Fine sediments of fluvio-lacustrine origin characterize the center of the valley.

The units as shown in the map (Mapa 2) will be referred to according to the following order:

- 1 Moraines (Choqueyapu II)
- 2 Moraines (Choqueyapu I)
- 3 Fan with blocks (Pleistocene)
- 4 Fan with blocks (Sup. Holocene)
- 5 Fan with gravel and sand (Sup. Holocene)
- 6 Fan with gravel, sand and silt (Lower to Middle Holocene)
- 7 Fan with sand, silt and gravel (Lower to Middle Holocene)
- 8 Fan with silt, clay, sand (Lower to Middle Holocene)
- 9 Deposits of the Rocha River (Holocene)
- 10 Landslide

Abanicos aluviales

Los depósitos fluviales en general están formados por sedimentos sueltos, transportados y depositados por los ríos, de acuerdo a su capacidad de carga, la cual varía dependiendo de sus caudales, sus inclinaciones y las dimensiones de sus cauces. Son mayormente materiales de grano grueso, formados por cantos rodados, pedrones y gravas con contenido de arenas, limos y arcillas, constituyendo los abanicos aluviales y los depósitos de cauce de río.

En los informes elaborados por el PIRHC (GEBOL - NNUU, 1978) y Gouzes & Delpont (1990), se distinguen abanicos de tres diferentes períodos (Tabla 6) dentro del Holoceno. Según estos trabajos, los abanicos más antiguos están ubicados cerca de la parte central de la cuenca, mientras que los abanicos más recientes se encuentran superpuestos en los bordes del valle.

Alluvial cones

In general, fluvial deposits are formed by loose sediments, and transported as well as deposited by the rivers in accordance with their load capacity, (depending on the river's flows, the inclinations and the dimensions of the river beds). These deposits are mainly coarse grained materials formed by rounded blocks, boulders and gravel with contents of sands, muds and clays. They constitute the alluvial cones and the deposits of river beds.

In the reports made by the PIRHC (GEBOL - UN, 1978) and Gouzes & Delpont (1990), distinctions are made between fans of three different periods (Table 6) during the Holocene. According to these works, the oldest fans are located near the central part of the basin, whereas the most recent fans are superimposed on the edges of the valley.

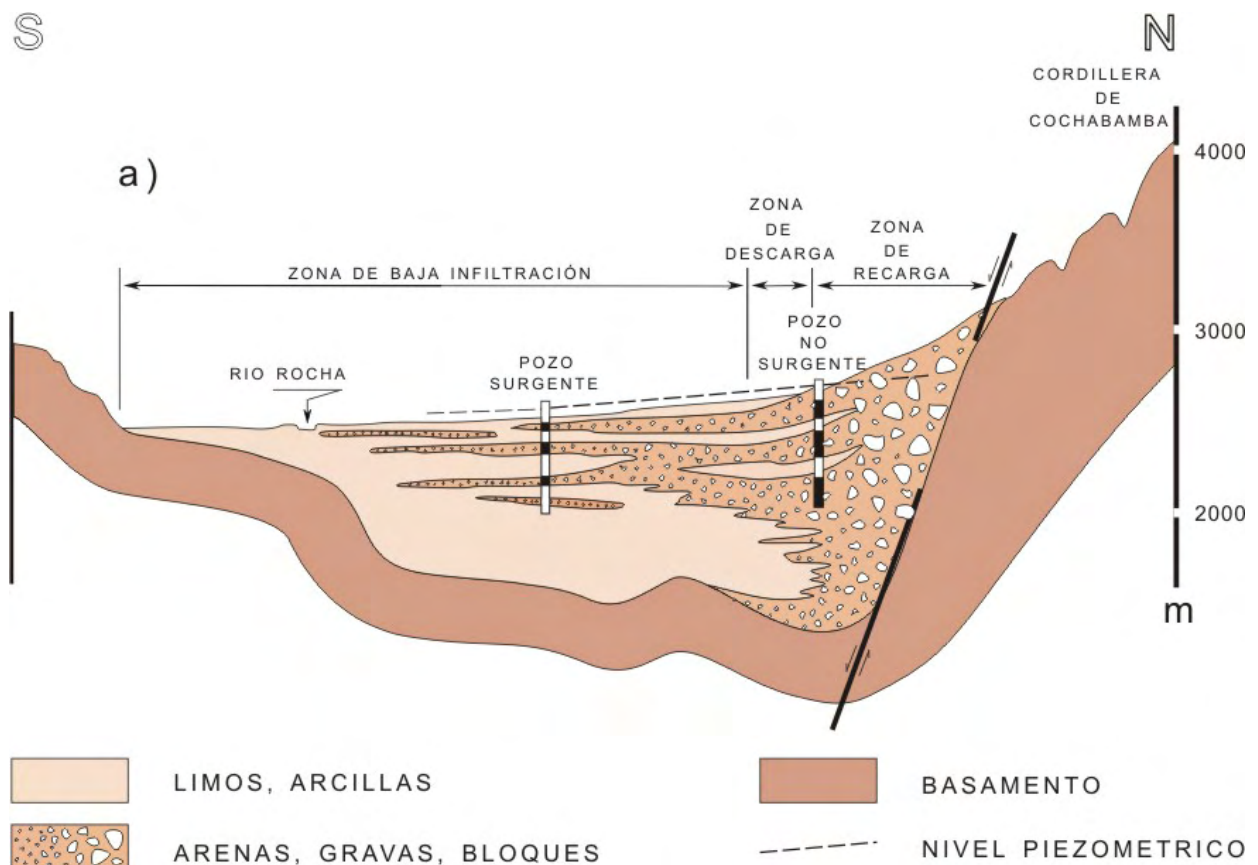


Fig. 10: Esquema geológico de la cuenca de Cochabamba propuesto por el PIRHC (GEBOL - NNUU, 1978) / Geological scheme of the basin of Cochabamba as suggested by the PIRHC (GEBOL - UN, 1978)

Este concepto es revocado por Veit (1992), que en su trabajo prueba que los abanicos más antiguos, clasificados como unidad 3 (Mapa 2), se ubican al borde de la cordillera (la cronología de los sedimentos del valle es discutida en el capítulo 3.3.3). Estos abanicos tienen una inclinación relativamente fuerte. A esta unidad pertenecen los abanicos del Río Llave y del Río Payrumani cuya edad relativa se deduce del grado de meteorización de los suelos rojos y de la correlación con las morrenas, cuyos cortes geológicos se pueden apreciar en la quebrada Payrumani. Por consiguiente, estos abanicos son de tipo aluvioglacial, con material no clasificado ni estratificado que además contienen grandes bloques con diámetros que alcanzan 5 a 7 m, tal como se observan en el abanico del Río Llave. Estos bloques que a veces son redondeados y pulidos, se encuentran en una matrix de grava, arena y limo.

Estos depósitos de textura gruesa tienen alta permeabilidad, por lo cual en superficie son secos y con escasa cobertura vegetal, lo que permite identificarlos claramente en las imágenes de satélite y fotografías aéreas (Fig. 2).

This concept is revoked by Veit (1992), who attempts to prove in his work that the oldest fans, classified as unit 3 (Map 2), are at the edge of the range (the chronology of the sediments of the valley is discussed in the chapter 3.3.3). These fans have a relatively steep slope. The fans of the Llave and Payrumani rivers form part of this unit. Their relative age is deduced from the degree of weathering of its red soils and from the correlation with the moraines, whose geological sections can be seen in the Payrumani Valley. As a result, these fans are shown to be of alluvio glacial type, containing unclassified and unstratified material. Furthermore these fans contain big blocks with diameters that reach 5 to 7 m like, for example, in the fan of the Llave- River. These blocks, which sometimes are rounded and polished lie within a matrix of gravel, sand and mud.

These deposits with a coarse texture have high permeability. Therefore, their surface is dry and with scarce vegetal coverage. This feature allows them to be easily identified in the satellite images and aerial photographs (Fig. 2).

Tabla 6: Clasificación de los sedimentos en el Valle de Cochabamba según los informes de GEOBOL & NACIONES UNIDAS (1978) y Gouzes & Delpont (1990) / Classification of the sediments in the Valley of Cochabamba according to the reports of GEOBOL & UNITED NATIONS (1978) and Gouzes & Delpont (1990)

TIPO DEPOSITO	CARACTERISTICAS	EDAD
DEPOSIT TYPE	CHARACTERISTICS	AGE
coluvio – aluvial	bloques angulosos	Holoceno
<i>Colluvium - alluvial</i>	<i>Angular blocks</i>	<i>Holocene</i>
Morrenas	bloques	Holoceno
<i>Moraines</i>	<i>Blocks</i>	<i>Holocene</i>
Fluvial	abanicos - recientes, modernos y antiguos	Holoceno
<i>Fluvial</i>	<i>Fans - recent, modern and old</i>	<i>Holocene</i>
fluvio-lacustre	arenas, gravas, limos	Plio – Pleistoceno
<i>Fluvio-lacustrine</i>	<i>Sands, gravels, muds</i>	<i>Plio - Pleistocene</i>
lacustre	arcillas, arenas, limos	Plio – Pleistoceno
<i>Lacustrine</i>	<i>Clays, sands, muds</i>	<i>Plio - Pleistocene</i>

Los abanicos de las unidades 6, 7 y 8 (Mapa 2) se extienden hacia el Río Rocha con menor pendiente, cortando los abanicos de la unidad 3 a los cuales se superponen en su parte distal, lo que significa que son más recientes que los de la unidad 3. En profundidad los abanicos de la unidad 3 se extienden hacia el Río Rocha (Mapa 2) lo que en superficie no es visible. Los suelos de los abanicos más recientes son del tipo cambisol, poco desarrollados. La evolución de estos abanicos no está relacionada con las glaciaciones, por lo que el material tiene una mejor clasificación y es de granulometría más fina, predominando limos y arcillas.

Los abanicos actuales corresponden a las unidades 4 y 5 (Mapa 2), los mismos que se presentan en dos formas dependiendo del tamaño de la subcuenca. Cuando la subcuenca es más grande como las de los ríos Llave y Payrumani, los abanicos antiguos han sido disectados, en algunos casos hasta una profundidad de 80 m. Estos valles hacia el Río Rocha disminuyen progresivamente y el lecho actual se amplía en forma de cono. Cuando la subcuenca es pequeña, las quebradas no son capaces de desarrollar un desagüe permanente y menos cortar los abanicos antiguos. Por lo tanto sus materiales son depositados superficialmente sobre los abanicos antiguos cuyo material es similar y probablemente forman el núcleo de los abanicos actuales.

Estas unidades 4 y 5 en parte son identificables en las imágenes de satélite por su coloración azul intensa que origina de la composición de la roca ordovícica. Se repite en las cumbres de la cordillera ordovícica en partes de escasa vegetación (Fig. 2).

En general todas las unidades cambian gradualmente su granulometría, de gruesa a fina, en dirección del Río Rocha.

Sedimentos del Río Rocha

La unidad 8 corresponde a los sedimentos del actual Río Rocha. La granulometría de los mismos varía en función al origen del aporte de sus afluentes. Por ejemplo en la zona del Río Viloma los materiales son más gruesos. Esta subcuenca aporta dichos materiales de los depósitos glaciales clasificados como unidades 1 y 2 (Mapa 2).

El Río Rocha en la actualidad ha cortado entre 4 a 6 m de profundidad los sedimentos de la cuenca, dejando una terraza de 2 m de altura, que contiene limo, arena e inclusive grava al sur de Vinto, al igual que en su confluencia con el Río Viloma. Durante el pasado reciente los afluentes del Río Rocha han podido transportar materia-

The fans of the units 6, 7 and 8 (Map 2) extend towards the Rocha- River with minor slopes. They cut through the fans of the unit 3 on which they are superimposed in their distal part. That means, that they are younger than those of the unit 3. The fans of the unit 3 extend towards the Rocha- River in the depth (Map 2), what is not visible on surface. The soils of the most recent fans are of the cambisol type and little developed. The origin of these fans is not related to glaciation which makes the material better classified and of finer granulometry with predominantly muds and clays.

The younger fans correspond to the units 4 or 5 (Map 2). Two types are identified, the nature of each depending on the size of the sub- basin. When the sub-basin is bigger than those of the Llave and Payrumani rivers, the old fans were dissected down to a depth of 80 m. These valleys which run towards the Rocha- River progressively shrink and the bed extends in the shape of a cone. When the sub-basin is small, gorges are not able to develop a permanent drain and, they are even less able to cut through the old fans. Therefore their materials are deposited superficially onto the old fans. The material that comprises the old fans, is similar to that of the younger fans and, probably form the center of the current fans.

Units 4 and 5 are easy to identify in the satellite images because of their very intense blue coloring that is linked to the composition of the Ordovician rocks. This situation also occurs in the Ordovician part of the mountain range, in areas where vegetation is scarce (Fig. 2).

In general, the granulometry of all the units gradually change from coarse to fine, in direction towards the Rocha- River.

Sediments of the Rocha- River

The unit 8 corresponds to the sediments of the current Rocha- River. Their granulometry varies according to the origin of the materials of its tributaries. For example, the materials in the area of the Viloma- River have coarser grains. This sub-basin carries these materials from the glacial deposits classified as units 1 and 2 (Map 2).

Presently, the Rocha River has cut through about 4 to 6 m deep into the sediments of the basin, leaving a 2 m high terrace that contains mud, sands and as well gravel in the south of Vinto, and at its confluence with the Viloma River. In the recent past, the tributaries of the Rocha River have been able to transport relatively coarse

les relativamente gruesos hacia el mismo río, en razón del desagüe lineal que al tener una mayor energía puede transportar materiales más gruesos. La sucesión de períodos con extensa acumulación sobre los conos de deyección y períodos con erosión lineal es la causa para la gran variación espacial de los diferentes depósitos. Durante el Plio-Pleistoceno se han producido muchos cambios de este tipo, dando como resultado un mosaico complejo de diferentes sedimentos con variaciones tanto en sentido horizontal como vertical.

3.3.2 Sedimentos superficiales en la Cordillera de Cochabamba

En la cordillera, depósitos glaciales son muy comunes. Los glaciares siempre han estado restringidos al área de la cordillera, sin llegar al nivel del valle. En el borde de la cordillera, depósitos de derrumbes y capas sedimentarias de espesor variable son muy frecuentes.

Morrenas

En la actualidad el límite de la nieve a nivel regional se estima entre 5.300 y 5.000 m s.n.m.. (Veit, 1990). La cumbre del cerro Tunari se encuentra a 5.035 m s.n.m., por lo cual no existe ningún glaciar en la Cordillera del Tunari.

materials towards this river, because their linear drain furnish them with more energy and, allow them to transport heavier materials. The succession of periods of large accumulation on the cones of dejection followed by periods of linear erosion is the cause for the large spatial variation of the different deposits. During the Plio- Pleistocene, many changes of this type took place, producing a complex mosaic of different sediments with variations in the horizontal as well as vertical directions.

3.3.2 Surface sediments in the Cordillera of Cochabamba

Glacial deposits are very common in the Cordilleran range. The glaciers have always been restricted to the area of the range, without reaching the level of the valley. At the edge of the range, landslide deposits and sedimentary strata of variable thickness are very frequent.

Moraines

Currently, the permanent snow line at regional level is estimated to be between 5,000 and 5,300 m above sea level (Veit, 1990). The summit of the Tunari Mountain is at 5.035 m above sea level and therefore does not have any glacier.

Tabla 7: El Pleistoceno en Bolivia / The Pleistocene in Bolivia

		CORDILLERA REAL			CORDILLERA APOLOBAMBA	ALTIPLANO
EDAD / AGE	Fuente / source	Troll (1935)	Dobrovoly (1962)	Servant (1977) / Ballivian (1978) / Argollo (1980)	Lauer & Rafiqpoor (1986)	Servant & Fontes (1978)
Pleistoceno Superior / Upper Pleistocene	Morrenas / moraines		Choqueyapu II / Choqueyapu I	Choqueyapu II / Choqueyapu I	Chacabaya / Canlaya	Tauca / Minchin
Pleistoceno Medio / Middle Pleistocene	Morrenas / moraines		Milluni	Sorata	Charazani	Ballivian
Pleistoceno Inferior / Lower Pleistocene	-		- / Calvario / Patapatani	Kaluyo / Calvario / -	-	-

Sobre la base del estudio de morrenas y formas glaciales como circos, valles en U, etc. se puede reconstruir la máxima extensión de los glaciales durante el Cuaternario Superior (Mapa 2), dando como resultado que ningún glacial alcanzó la llanura del valle de Cochabamba durante esa época.

Se distinguen dos generaciones de morrenas con distintos relieves y diferentes alturas, con una extensión máxima que llega a los 3.400 m s.n.m.. Las morrenas de la unidad 2 (Mapa 2) alcanzan alturas mínimas en el flanco sur del cerro Tunari en los valles de los ríos Potrero, Llave y Payrumani, con espesores hasta de 100 m, donde el límite de nieve fósil se reconstruye en los 4.100 m s.n.m. y la depresión entre los 1.200 y 1.300 m.

Las morrenas de la unidad 1 son de poca extensión. Se encuentran sólo en algunas cumbres que sobrepasan los 4.600 m s.n.m., y descienden hasta los 4.000 m s.n.m. con un límite de nieve reconstruido a 4.600 m s.n.m. y una depresión de 700 a 800 m. Son de poco espesor y mal preservadas por la morfodinámica periglacial de las alturas.

Depósitos glaciales más antiguos son difíciles de distinguir en comparación con otras regiones de los Andes en Sudamérica.

Las morrenas documentan una depresión de la temperatura media anual y el incremento de la precipitación (Hasenrath & Kutzenbach, 1988). Por lo tanto la cantidad de lluvia, la poca evaporación y las extensas cubiertas de hielo influyeron en el desagüe de ríos y quebradas lo que explica la formación de los abanicos grandes y la composición de la unidad 3 (Mapa 2).

Todos los depósitos descritos son producto de las glaciaciones que en América se conocen como grandes glaciaciones, separadas por períodos interglaciales que abarcaron cerca de 2 millones de años. Las diferentes glaciaciones se presentan en la Tabla 7.

Derrumbes

Los derrumbes, que han sido clasificados como unidad 10, son un fenómeno común en la cordillera, causados por la inestabilidad de las rocas debido al relieve, fuerte pendiente y la actividad tectónica. Los más conocidos son el de Sipe Sipe, del Río Llave y del Río Chako (Mapa 2). En el caso del Río Llave, el derrumbe cayó sobre el glaciar, causando la incorporación en los conos de este material que junto con el material morénico forman los sedimentos fluvio-glaciales.

The maximum extension of the glaciers during the Upper Quaternary can be reconstructed on the basis of the study of moraines and glacial forms like cirques, U-shaped valleys etc. (Map 2). According to these results, no glacier reached the plain of the valley of Cochabamba during that period.

Two generations of moraines can be identified, each of them with different reliefs and heights, but, all with maximum extensions reaching down to 3.400 m. The moraines of the unit 2 (Map 2) reach minimum heights on the southern flank of the Tunari mountain, in the valleys of the Potrero, Llave and Payrumani rivers, and have thicknesses of up to 100 m. Here, the fossil snow limit is reconstructed at about 4.100 m above sea level and the depression between 1.200 and 1.300 m.

The moraines of the unit 1 are of little extension. They are only found in some summits that surpass the 4.600 m, and descend to 4.000 m, where the reconstructed snow limit lies at 4.600 m and a depression is of 700 to 800 m. They are of little thickness and badly preserved due to the periglacial morphodynamic activity.

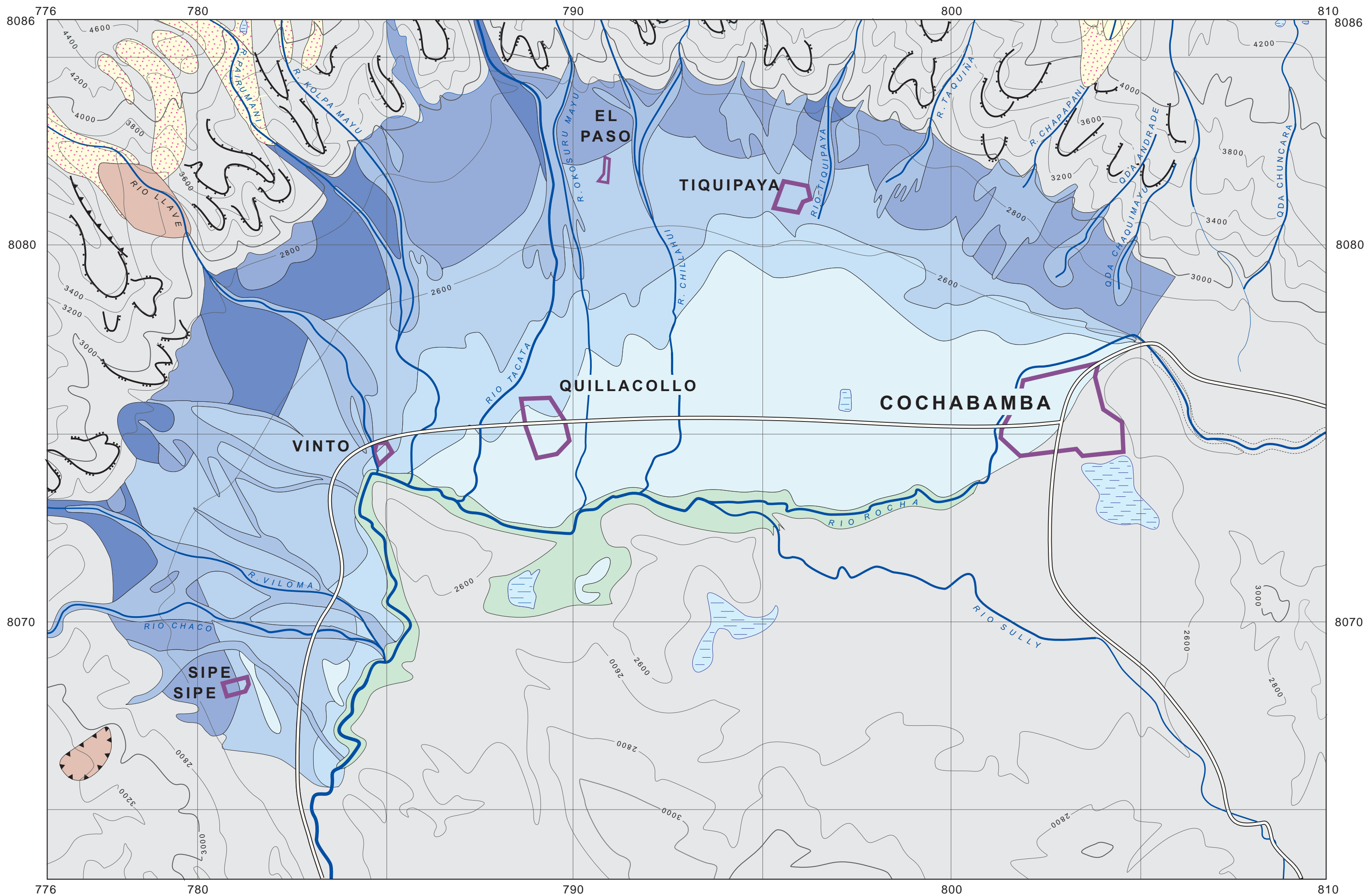
Older glacial deposits are difficult to identify in comparison to other regions of the Andes in South America.

The moraines document a former depression of the annual average temperature and a higher precipitation (Hasenrath & Kutzenbach, 1988). The amount of rain, low evaporation and the large covers of ice influenced the drainage processes of rivers and gorges. These factors all contributed to the formation of the big fans and, also help to explain the composition of the unit 3 (Map 2).

All the deposits recently described were produced during the glaciation that in America is known as the great glaciation, separated by interglacial periods that lasted nearly 2 million years. The different glaciations are presented in the Tabla 7.







Landslides

The landslides (classified as unit "10"), are a common phenomenon in the Cordilleran range. They are caused by the instability of the rocks due to sharp slopes and tectonic activity. The best known are those of Sipe Sipe, the Río Llave and the Chaco River (Map 2). In the Llave River landslide, the collapse fell onto the glacier, causing the incorporation in the cones of this material that, together with the moraine material, form the fluvio-glacial sediments.


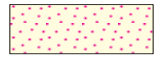
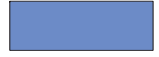












**MAPA SEDIMENTOLOGICO
DEL CUATERNARIO
VALLE CENTRAL DE COCHABAMBA**

SIGNOS CONVENCIONALES

-  CIUDAD
-  CARRETERA
-  RIO
-  LAGUNA
-  ARENA
-  CURVA DE NIVEL

SIGNOS ESPECIALES

-  MORRENAS (CHOQUEYAPU II)
-  MORRENAS (CHOQUEYAPU I)
-  ABANICO CON BLOQUES (PLEISTOCENO)
-  ABANICO CON BLOQUES (HOLOCENO SUP.)
-  ABANICO CON GRAVAS Y ARENA (HOLOCENO SUP.)
-  ABANICO CON GRAVAS, ARENA, LIMO (HOLOCENO INF. - MEDIO)
-  ABANICO CON ARENA, LIMO, GRAVAS (HOLOCENO INF. - MEDIO)
-  ABANICO CON LIMO, ARCILLA, ARENA (HOLOCENO INF. - MEDIO)
-  SEDIMENTOS DEL RIO ROCHA, LIMO Y ARENA, EN PARTES GRAVAS (HOLOCENO)
-  DERRUMBE
-  BORDE SUP. DEL NICHOS DE PROCEDENCIA
-  PEDIMENTO I, >3700 m s.n.m
-  PEDIMENTO II, >3400 m s.n.m
-  PEDIMENTO III, >2900 m s.n.m

ESCALA: APROX. 1 : 85 000

Depósitos coluvio-aluviales y pedimentos

El flanco sur de la cordillera está cubierto con sedimentos caracterizados por materiales caóticos y gruesos de variable espesor, que a veces sobrepasan los 10 m. Son depósitos coluvio-aluviales que representan períodos de clima de lluvias intensas y poca vegetación y que están relacionados con las morrenas y los abanicos, lo que indica una edad relativamente elevada.

Por otro lado, entre el nivel altiplánico y la llanura del valle se pueden identificar por lo menos tres niveles de pedimentos, a los 3.700, 3.400 y 2.900 m s.n.m. de altitud, que son formas de erosión, cuyas diferentes altitudes indican el levantamiento tectónico de la cordillera y la elevación o depresión de la línea de nieve (Mapa 2).

3.3.3 Edad de los sedimentos

Los suelos son indicadores de edades, pues todos los paleosuelos se han formado en función de ambientes específicos. Los abanicos de la unidad 3, pedimentos y otras capas sedimentarias se distinguen por la presencia de suelos bien desarrollados de tipo luvisol (FAO-UNESCO 1988). Para su evolución necesitan condiciones climáticas bastante más húmedas que en la actualidad. El último período favorable para la formación de estos suelos fue el tardiglacial entre el Pleistoceno Superior y el Holoceno Inferior, aproximadamente hace 15.000 a 10.000 años Bp¹ (Servant & Fontes 1978, Graf 1981, Veit & Stingl 1991).

En sedimentos del Holoceno faltan los luvisols y más bien se desarrollaron suelos de tipo cambisols de climas similares al actual.

Los abanicos más recientes de las unidades 4 y 5 tienen solamente suelos iniciales, porque en parte se encuentran activos hasta la actualidad. Pertenecen al Holoceno Superior.

Glaciaciones del Cuaternario Superior

En base a indicadores regionales, la preservación de las morrenas y dimensión de depresión del límite de la nieve, se ha estimado que estos depósitos pertenecen al Cuaternario Superior, entre 28.000 años Bp y 15.000 a 10.000 años Bp, que corresponden a las glaciaciones Choqueyapu I y Choqueyapu II, tal como se presentan en Tabla 7.

Colluvio- alluvial deposits and pediments

The southern flank of the range is covered with sediments characterized by chaotic and thick materials of variable thickness, which sometimes measure more than 10 m. These materials are colluvio- alluvial deposits representing periods of climate with intensive rainfalls and little vegetation and which are related to the moraines and the fans, which indicates a relatively high age.

Between the level of the Altiplano and the bottom of the valley, at least three levels of pediments can be identified, at 3,700, 3,400 and 2,900 m altitude. These are types of erosional forms whose presence in different altitudes indicate the tectonic raising of the range and the raising or lowering of the snow line (Map 2).

3.3.3 Age of the sediments

Soils are age indicators, because all of the paleosoils have been formed according to specific environments. The fans of the unit 3 as well as the pediments and other sedimentary strata are distinguishable because they contain well-developed soils of the luvisol type (FAO-UNESCO 1988). In order for them to evolve, climate conditions need to be much more humid than they currently are. The last favorable period for the formation of these soils was the tardiglacial period between the Upper Pleistocene and the Lower Holocene; approximately 15,000 to 10,000 years Bp (Servant & Fontes 1978, Graf 1981, Veit & Stingl 1991).

In sediments of the Holocene, the "luvisols" are lacking. Instead, soils of "cambisol" type developed in climates similar to the current ones.

The most recent fans of the units 4 and 5 have only initial soils, partially because they are still active. They belong to the Upper Holocene.

Glaciation of the Upper Quaternary

It has been estimated that the moraines belong to the Upper Quaternary, between 28,000 and 15,000 to 10,000 years Bp, i.e. during the glaciations of Choqueyapu I and Choqueyapu II. This estimate is based on regional indicators, the conservation of the moraines and the magnitude of the lowering of the snow line (see Tabla 7)

¹ (Bp) = antes del presente / before present.

Los abanicos de la unidad 3 están en contacto con las morrenas de la glaciación Choqueyapu I y por lo tanto pertenecen al Pleistoceno Superior. La extensa glaciación y alta precipitación está documentada en los niveles de los lagos altiplánicos Minchín y Tauca (actual lago Titicaca) (Tabla 7).

CABAS, mediante J. Strahl (1998), efectuó un estudio palinológico de alta resolución en un pozo perforado en la ciudad de Cochabamba, cortando mayormente materiales lacustres hasta una profundidad de 192 m. Las muestras han sido extraídas cada 1 o 2 metros, llegando a un número total de 186 análisis palinológicos. Mediante los resultados se han distinguido cuatro niveles o *zonas de acumulación polínica local* (ZAPL) que representan cuatro distintas épocas climáticas.

El nivel inferior, entre 194 y 156 m de profundidad presenta material que permite determinar un ambiente de deposición de clima frío y húmedo, que muy probablemente equivale al período de glaciación Choquellapu I (Pleistoceno superior) mencionado por Veit (1992). Entre 155 y 105 m de profundidad, los depósitos han sido originados en un interstadial que en los niveles superiores cambia hacia un período de transición, con condiciones más y más frías, terminando en el tercer nivel (104 – 56 m), el cual es constituido por sedimentos depositados en época glacial. El clima en éste período es definitivamente más frío que en la primera ZAPL y muy probablemente corresponde a la glaciación Choquellapu II discutida por Veit (1992) y a la glaciación de Weichsel 2. La parte superior de éste nivel y la cuarta ZAPL se compone mayormente de material fluvial. Las muestras del cuarto nivel probablemente han sido contaminadas con material reciente y por lo tanto no dieron resultados fiables.

3.3.4 Interpretación cronológica de la evolución del Valle Central desde el Plioceno

Los límites cronológicos entre el Plioceno-Pleistoceno y Holoceno no están bien definidos en América como en Europa. Sin embargo, se estima el límite entre el Plioceno y el Pleistoceno en 2 millones de años Bp, y el límite entre el Pleistoceno y Holoceno en 12.000 años Bp.

Según Veit (1992), en el Terciario Superior se formó el graben de la región por los movimientos tectónicos de bloques ascendentes y descendentes, produciendo el Valle de Cochabamba y el levantamiento de la cordillera. Veit postula que en aquel tiempo se formó un lago en el valle, iniciando la deposición de sedimentos lacustres y fluvio-lacustres (Fig. 11-1), los cuales hoy afloran

The fans of the unit 3 are in contact with the moraines of the glaciación Choqueyapu I and therefore belong to the Upper Pleistocene. The large glaciación and high precipitation of that time is documented by the levels of the Altiplano lakes Minchín and Tauca (currently Titicaca Lake) (Tabla 7)

CABAS, by J. Strahl (1998), carried out a palinological study of high resolution in a hole drilled in the city of Cochabamba. The drill cut mainly lacustrine material down to a depth of 192 m. Samples have been extracted every 1 or 2 meters, reaching a total number of 186 palinological analyses. As a result, four levels or areas of local polinic accumulation have been distinguished (ZAPL) representing four different climatic periods.

The inferior level, between 194 and 156 m of depth contains material that documents a deposition environment of cold and humid climate that very probably is equivalent to the period of glaciación Choquellapu I (Upper Pleistocene) as mentioned by Veit (1992). The deposits between 155 and 105 m of depth, originated in an interstadial period that changes in the upper levels towards a transitional period with increasingly colder conditions. They end with the third level (104 - 56 m), which consists of sediments deposited in glacial period. The climate in this period is definitely colder than in the first ZAPL and, very probably corresponds to the Choquellapu II glaciación discussed by Veit (1992). In turn this glaciación corresponds to the glaciación of "Weichsel 2". The top of this level (and the fourth ZAPL), is mainly composed of fluvial material. The samples of the fourth level probably have been contaminated with recent material and therefore, do not yield reliable results.

3.3.4 Evolution of the Central Valley since the Pliocene

The chronological limits between the Pliocene, Pleistocene and Holocene in America are not as well defined as they are in Europe. Never the less, the limit between the Pliocene and the Pleistocene is thought to lie around 2 million years Bp, and the limit between the Pleistocene and Holocene at 12,000 years Bp.

According to Veit (1992), during the Upper Tertiary, the graben of the region was formed by the tectonic movements of ascending and descending blocks which produced the Valley of Cochabamba and the raising of the Cordilleran range. Veit postulates that at that time a lake was formed in the valley, initiating the deposition of lacustrine and fluvio-lacustrine sediments (Fig.

en el Valle de Sacaba. Esta hipótesis es válida en términos cualitativos pero no ha podido ser reforzada mediante el estudio de Strahl (1998) que no identifica depósitos más antiguos que del pleistoceno superior.

Sin embargo se puede mantener, que durante el Pleistoceno y probablemente parte del Plioceno Superior, existían lagos cerrados de sedimentación tranquila y ambiente reductor, posiblemente palúdico, donde se depositaron materiales arcillosos y arcillo-arenosos con alto contenido orgánico e incremento de salinidad. Durante la fase lacustre y escasa actividad tectónica se desarrollaron pedimentos cuyos materiales gruesos se habrán depositado en el margen del lago muy cerca del contacto con las rocas paleozoicas (Mapa 2) y los materiales finos, en suspensión, en el lecho del lago. A medida que el frente del lago avanzaba y retrocedía, se formó una interstratificación de material fino y grueso en la cuenca.

El posterior desagüe del lago según Veit (1992) tiene un origen tectónico y, puede haberse producido por dos procesos: (a) Entre el Plioceno Superior y el Pleistoceno Inferior se dieron los últimos movimientos tectónicos andinos, que ocasionaron el hundimiento del bloque de rocas terciarias y cretácicas al sur de Suticollo, que actuaba como umbral, produciendo el desagüe del lago. Sin embargo, no es muy probable que este bloque se haya hundido y luego retomado su posición elevada que ocupa presentemente. Mas factible parece el modelo (b), según el cual el lago no estaba estancado detrás del umbral de Suticollo, sino detrás de un dorsal del basamento al noreste de Vinto (Fig. 11-1). Con las actividades tectónicas en la falla de Vinto durante el Plioceno, probablemente se produjo el hundimiento del dorsal y así el desagüe del lago (Fig. 11-2). Un tal dorsal se distingue en los registros geofísicos. Sin embargo, la afirmación de este modelo requiere una investigación más profunda.

3.4 Geología estructural

Las estructuras geológicas siguen como dirección principal noroeste-sureste, al igual que los lineamientos más importantes que se distinguen en la zona (Mapa 1).

En la cuenca de Cochabamba se distinguen dos sistemas de fallas consideradas como las más importantes y que todavía se encuentran activas. Una falla inversa de carácter regional con dirección noroeste-sureste, de-

11-1). Today, sediments from this lake crop out in the Valley of Sacaba. This hypothesis is likely to be correct but could not be verified by the study of Strahl (1998), which does not identify older deposits than of the Upper Pleistocene age.

It is safe to say, that during the Pleistocene and probably part of the Upper Pliocene, closed lakes of calm sedimentation and reductive environment existed, which were possibly sapropelitic. Clayey and silty materials with high organic contents increased salinity were deposited in them. During the lake phase and scarce tectonic activity, pediments were developed whose coarse materials might have been deposited at the edge of the lake very near to the contact with the Paleozoic rocks (Map 2) and, the fine materials, in suspension, on the ground of the lake. As the shoreline of the lake moved forth and back, an interstratification of fine and coarse material was formed in the basin.

The subsequent drain of the lake according to Veit (1992) has a tectonic origin and, might have been produced by two processes: (a) The first taking place between the Upper Pliocene and the Lower Pleistocene. They are the last Andean tectonic movements which might have caused the descent of the block of Tertiary and Cretaceous rocks in the south of Suticollo. Since these rocks bordered the lake, their sinking would have caused it to drain. However, it is not very probable that this block has sunk and afterwards rose up again to occupy its current high position. More feasible seems to be the model (b), According to this model the lake was not stagnated behind the threshold of Suticollo, but behind a ridge of the basement in the northeast of Vinto (Fig. 11-1). With the tectonic activities in the fault of Vinto during the Pliocene, probably the descent of the ridge was produced affecting the drain of the lake (Fig. 11-2). A ridge fitting this description is distinguished in the geophysical records. However, the confirmation of this model requires a more intense research.

3.4 Structural geology

The geological structures follow as a general strike the northwest-southeast direction, the same as other important lineaments found in the area (Map 1).

In the basin of Cochabamba, there are two important fault- systems which are still active. The first one is a reverse fault of regional character with northwest-southeast direction, called Sipe Sipe fault, which

nominada falla de Sipe Sipe, que pasa por las cercanías de la población del mismo nombre. Esta estructura pone en contacto rocas ordovícicas con rocas cretácicas, terciarias y cuaternarias. La otra es la falla Tunari, que se desarrolla en dirección este-oeste. Se encuentra en la base de la Cordillera del Tunari y es el origen de la diferencia de altura que existe entre la montaña y la llanura del Valle Central de Cochabamba.

De acuerdo a la reseña del mapa geológico, Hoja Cochabamba (SGB serie I-CGB-28, 1994), el análisis de los depósitos ordovícicos de la zona indica condiciones distensivas hasta el Llanvirniano. Posteriormente, en el Llandeiliano-Caradociano, por una fase compresiva se modificaron las áreas de aporte y deposición.

Posteriormente, las fases compresivas Incaica y Quechuana (Eoceno/Oligoceno Sup.- Mioceno Sup.) impulsaron el ascenso de la Cordillera Oriental ocasionando acortamientos y corrimientos. Durante la fase Andina se desarrollan fallas de tipo inverso de gran extensión con buzamiento general hacia el nor-este, originando rechazos importantes, tales así que rocas del Ordovícico Superior están en contacto con rocas meso-cenozoicas.

Las cuencas del área de Cochabamba parecen ser el resultado de la deflexión de la cadena montañosa y la formación de fallas de desplazamiento de rumbo. Sin embargo existen diferentes interpretaciones con respecto a la formación de estas excepcionales estructuras en la Cordillera Oriental.

Sheffels (1988) concluyó que las cuencas se formaron como resultado de un modelo de tectónica epidérmica en la Cordillera Real.

Según Kennan et al. (1995), estas cuencas fueron formadas por un sistema de fallas de desplazamiento de rumbo, de tendencia ESE y fallas normales. Generalmente estas fallas forman los límites norte y nororiental de las cuencas (véase Mapa 1).

Determinaciones de edades radiométricas de niveles de tobas intercaladas en el relleno de la cuenca sugieren que las mismas, aunque morfológicamente similares, se hayan formado en tiempos diferentes durante el Mioceno y Plioceno. Las fallas de borde de cuenca probablemente estuvieron activas desde el Mioceno temprano o incluso el cretácico con movimientos de dirección de rumbo sinestral.

passes near of the village with the same name. This structure puts Ordovician rocks in contact with rocks of Cretaceous, Tertiary and Quaternary age. The other fault system is the Tunari- fault that lies in in east-west direction and is located along the base of the Tunari- Range. this fault is responsables for the differences in altitude existing between the mountains and the plain of the Central Valley of Cochabamba.

According to the review of the geological map, Cochabamba quadrangle (SGB series I-CGB-28, 1994), the analysis of the Ordovician deposits of the area indicate distensive conditions up to the Llanvirnian. Later, in Llandeilian- Caradocian, the source and deposition areas were modified duringa compressive phase .

Later, the compressive Incaic and Quechua phases (Eocene/Upper Oligocene - Upper Miocene) gave impulse to the rise of the Eastern Cordillera and caused shortenings and strike- slip movements. During the Andean phase, reverse- type faults with big extension were formed with general dipping- angles towards the east. They gave rise to important backthrusts, so that rocks of the Upper Ordovician were put in contact with Meso and Cenozoic rocks.

The basins of the Cochabamba area seem to be the result of the deflection of the mountainous chain and the formation of strike slip faults. However, there are many different interpretations with regard to the formation of these exceptional structures in the Eastern Cordillera.

Sheffels (1988) concluded that the basins were formed as result of a model of epidermic tectonics in the Cordillera Real.

According to Kennan et al. (1995), these basins were formed by a system of ESE- trending strike- slip and normal faults. Generally, these faults form the northern and northeastern limits of the basins (see Map 1).

Determination of radiometric ages of tuff levels intercalated in the filling of the basin suggests that, although morphologically similar, they were formed during different times in the Miocene and Pliocene. The faults at the edges of the basin were probably active since the early Miocene or even the Cretaceous with movements of sinestral direction.

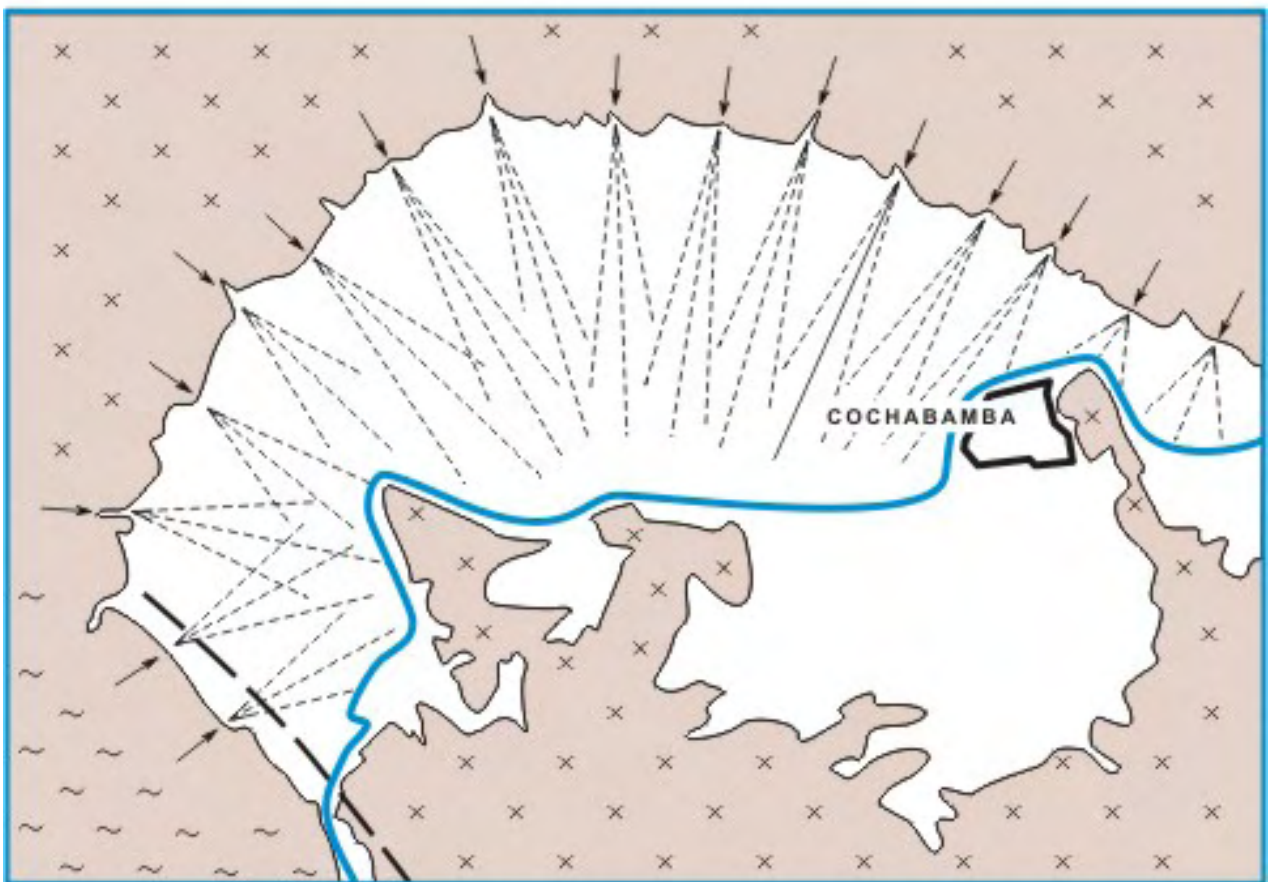
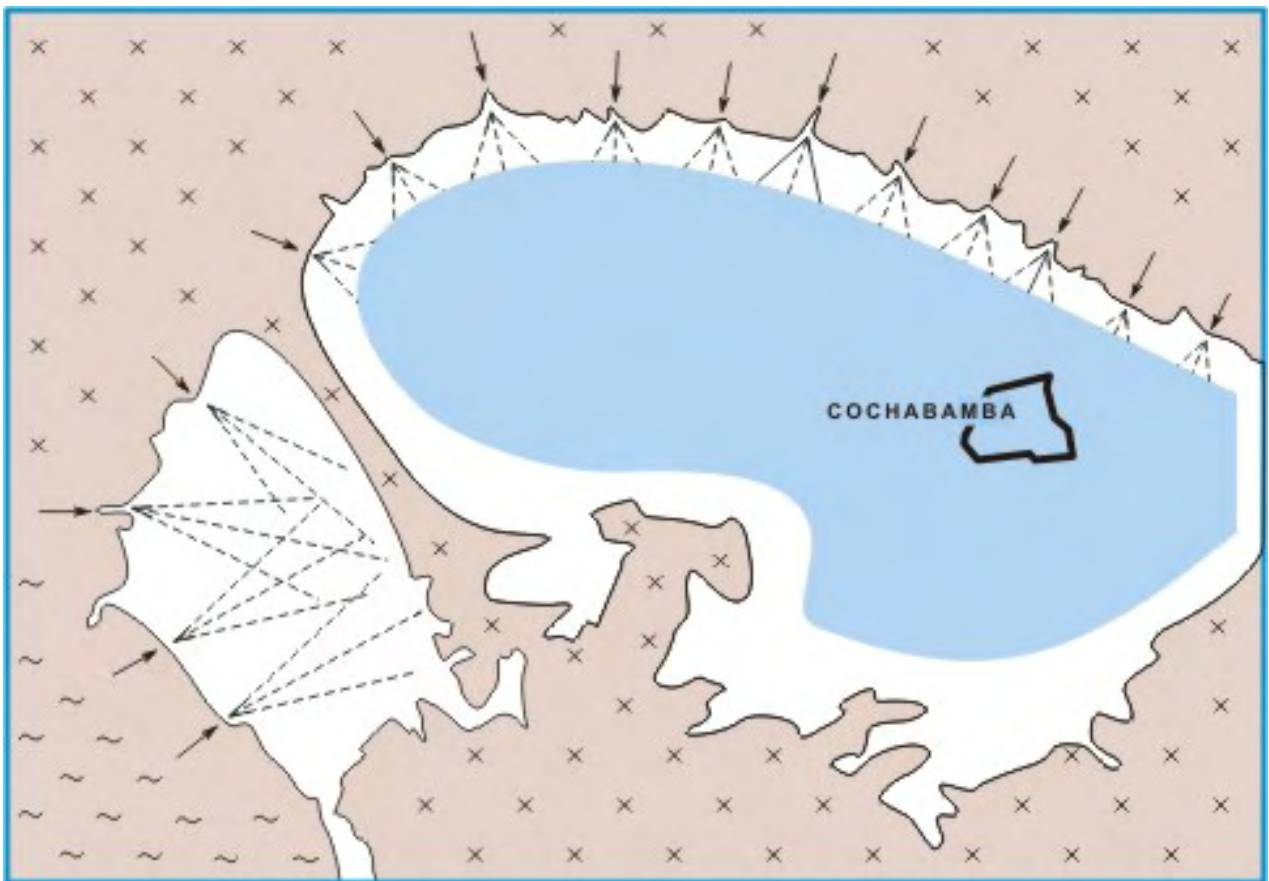


Fig. 11: La evolución de la cuenca de Cochabamba durante el Plio- Pleistoceno / The evolution of the Cochabamba basin during the Plio- Pleistocene

4 INVESTIGACIONES GEOFÍSICAS

4 GEOPHYSICAL RESEARCH

4.1 Introducción

En el año 1974, en el marco del "Proyecto Integrado de Recursos Hídricos en Cochabamba" (PIRHC), fue llevado a cabo la primera gran investigación geofísica en el Valle Central. La información proporcionada por éste trabajo ha sido la base para muchas investigaciones posteriores, como también para las del Proyecto CABAS.

4.1 Introduction

In 1974, within the framework of the "Integrated Project of Hydric Resources in Cochabamba" (PIRHC), the first big geophysical research in the Central Valley was carried out. The information provided by this work has been the basis for further studies, as well as for those of the CABAS Project.

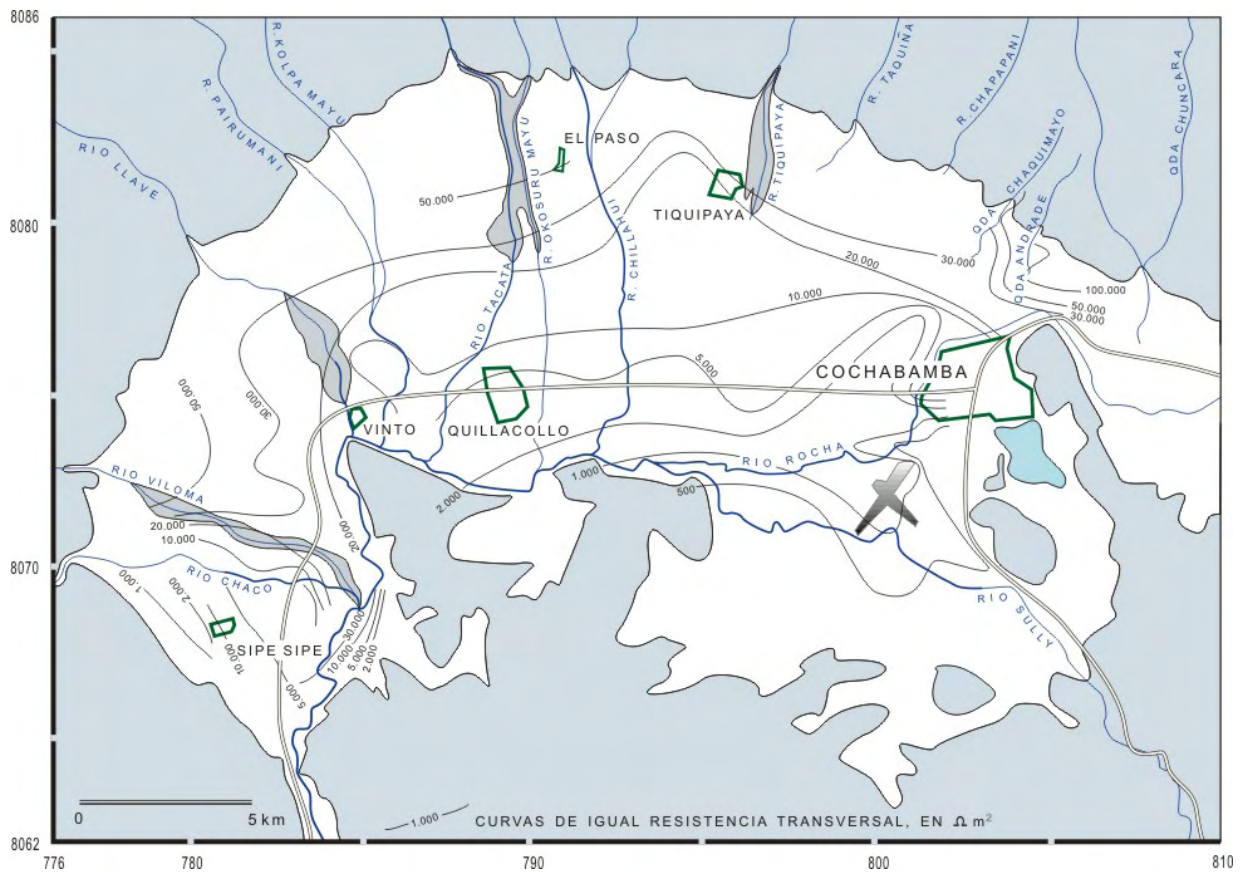


Fig. 12: Mapa de resistencia transversal elaborada por el PIRHC (GEBOL - NNUU, 1978) / Map of transversal resistivity made by PIRHC (GEBOL - UN, 1978)

En el marco del Proyecto CABAS, en el año 1992, personal del Instituto Federal de Geociencias y Recursos Naturales de Alemania (BGR) y el Servicio Geológico de Bolivia (GEOBOL) realizaron una investigación geofísica en el Valle de Cochabamba, con el objetivo de profundizar la información del subsuelo en base a sondeos eléctricos verticales. Los mismos fueron evaluados, interpretados y presentados en un informe (Fielitz et al., IT CABAS N°8, 1992)

Posterior al trabajo geofísico del Proyecto CABAS, el consorcio SEURECA-BRGM-SOGREAH-CGL en 1993 efectuó un estudio basado en sondeos audiomagnetotéluricos enfocado en la determinación de la profundidad del basamento y el espesor de los sedimentos plioceno-cuaternarios.

Todos los trabajos mencionados, excepto la investigación de SEURECA-BRGM-SOGREAH-CGL, fueron llevados a cabo mediante sondeos eléctricos verticales (SEV). En términos generales, los SEV permiten la diferenciación de sedimentos de granos gruesos y de granos finos por sus diferentes resistividades. Asumiendo una resistividad alta del agua subterránea, los sedimentos de granos finos como arcilla y limos tienen resistividades reducidas, mientras que sedimentos de granos gruesos, como arenas gruesas, cascajo y guijarros tienen resistividades elevadas. Sales disueltas en el agua subterránea reducen la resistividad de un acuífero. Sin embargo, en el Valle de Cochabamba ésta influencia no es significativa, ya que allí el agua del subsuelo generalmente tiene una conductividad reducida (aprox. 200-1700 $\mu\text{S}/\text{cm}$), lo que facilita la diferenciación entre los diferentes sedimentos en base a sus resistividades.

4.2 Investigación geofísica por el PIRHC

El año 1974 el Proyecto Integrado de Recursos Hídricos en Cochabamba (PIRHC), realizó un estudio geofísico (sondeos eléctricos verticales) orientado a la investigación de aguas subterráneas para básicamente determinar las propiedades geoeléctricas de los sedimentos y clasificarlos según sus características y su distribución y en base a ello recomendar zonas de prioridad para la perforación de pozos.

Se realizaron 168 sondeos, distribuidos en 10 perfiles transversales cubriendo una longitud total de 115 km de perfil, y un área de aproximadamente 380 km².

As part of the CABAS Project, in 1992, staff of the Federal Institute of Geosciences and Natural Resources of Germany (BGR) and the Geological Service of Bolivia (GEOBOL) carried out a geophysical research in the Valley of Cochabamba, with the goal of extending the information of the underground based on vertical resistivity measurements. These were evaluated, interpreted and presented in a report (Fielitz et al., IT CABAS N°8, 1992).

Later, in 1993, the SEURECA-BRGM-SOGREAH-CGL partnership carried out a study based on audiomagnetotelluric investigations focused on the determination of the depth of the basement and the thickness of the Pliocene- Quaternary sediments.

All the studies mentioned, except for the research of SEURECA-BRGM-SOGREAH-CGL, were carried out by vertical resistivity surveys (VRS). In general, the VRS allows the differentiation of coarse and fine-grained sediments due to their different resistivities. Assuming a high resistivity of the subsurface water, fine grained sediments like clay and mud have reduced resistivity, whereas coarse-grained sediments like coarse sands, gravel and pebbles have high resistivity. Salts dissolved in groundwater reduce the resistivity of an aquifer. However, in the Valley of Cochabamba this influence is not significant, because the groundwater generally has a reduced conductivity (approx. 200-1700 $\mu\text{S}/\text{cm}$), which facilitates the differentiation between the different sediments based on their distinct resistivities.

4.2 Geophysical research by PIRHC

In 1974, the Integrated Project of Hydric Resources in Cochabamba (PIRHC), carried out a geophysical study (vertical resistivity soundings) focused on groundwater, in order to determine the geoelectric properties of the sediments so as to classify them according to their characteristics and distribution. Based on that, they recommended target- areas for the perforation of wells.

168 soundings were carried out, distributed into 10 transversal profiles covering a total length of 115 km of profile, and an area of approximately 380 km².

4.2.1 Mapa de resistencia transversal

En base a los cortes transversales se elaboró un mapa de resistencia transversal que permite una evaluación de la distribución de las capas resistivas (Fig. 12).

La resistencia transversal resulta como la suma de los productos de la resistividad (en ohm m) y el grosor de la capa (en m) para todas las capas del rango de profundidades considerado. Así, los valores calculados tienen la dimensión ohm m^2 .

El mapa de iso-resistencias elaborado por el PIRHC representa la resistencia transversal del espesor completo del relleno sedimentario del Valle Central. Por lo tanto, la resistencia transversal resulta ser función tanto de la resistividad de las formaciones como de su espesor.

Las curvas de iso-resistencias indican valores de 500 a 50.000 ohm m^2 (Fig. 12). Los valores más altos están localizados en la zona norte y noroeste de la cuenca alcanzando valores desde 20.000 a 50.000 ohm m^2 . Estos valores se extienden hasta las comunidades de Mallcu Chapi, Mallcu Rancho y Viloma.

Los sedimentos permeables del abanico de El Paso están demarcados por la curva 20.000 ohm m^2 con una inflexión cóncava hacia el centro de la cuenca con una disminución de la resistividad y consecuentemente el espesor de los sedimentos gruesos.

Las zonas de resistencia transversal baja se sitúan en el sector sur-sureste y suroeste de la cuenca con valores que varían entre 2.000 y menos de 500 ohm m^2 indicando una composición arcillosa predominante con excepcionales lentes arenosas con agua de elevado contenido salino. Similares valores se encuentran en la región de Sipe Sipe donde las depresiones en las rocas paleozoicas y cretácicas están rellenas por arcilla y arena fina.

Las zonas con resistencia transversal elevada e intermedia se consideran como las más importantes para la captación de agua subterránea localizadas en el sector norte y noroeste y parte central de la cuenca, donde se desarrollan acuíferos complejos multicapas con características confinadas y semiconfinadas.

4.2.2 Profundidad del basamento

El estudio geoelectrico ha permitido estimar el espesor de los sedimentos no consolidados que rellenan la cuenca, encontrando sedimentos de menor espesor en la zona sur de la cuenca aumentando hacia el norte

4.2.1 Map of transversal resistivity

Based on the cross-sections, a map of transversal resistivity was elaborated that permits an evaluation of the distribution of the resistive strata (Fig. 12).

The transversal resistivity is the sum of the products of the resistivity (in ohm m) and the thickness of the stratum (in m) for all the strata of the range of depths considered. Thus, the calculated values have the dimension ohm m^2 .

The map of iso-resistivity elaborated by the PIRHC displays the transversal resistivity of the entire thickness of the sedimentary filling of the Central Valley. Therefore, the transversal resistivity is a function of the resistivity of the formations as well their thickness.

The curves of iso-resistivity indicate values of 500 to 50.000 ohm m^2 (Fig. 12). The higher values are located in the northern and northwestern area of the basin reaching values from 20.000 to 50.000 ohm m^2 . These values extend to the communities of Mallcu Chapi, Mallcu Rancho and Viloma.

The permeable sediments of the El Paso fan are marked by the curve 20,000 ohm m^2 with a concave bent towards the center of the basin and a decrease in the resistivity and consequently of the thickness of the coarse sediments.

The areas of low transversal resistivity are located in the south, southeastern and southwestern sector of the basin with values that vary between 2.000 and less than 500 ohm m^2 . These values indicate a predominantly clayey composition with some sandy lenses with water of high saline content. Similar values are found in the region of Sipe Sipe where the depressions in the Paleozoic and Cretaceous rocks are filled with clay and fine sand.

Areas with high and intermediate transversal resistivity, are considered the most important groundwater host formations. They are located in the northern and northwestern sector and the central part of the basin, where complex multilayered aquifers with confined and semiconfined characteristics are developed

4.2.2 Depth of the basement

The geoelectric study has permitted to estimate the thickness of the non-consolidated sediments that fill the basin. The study discovered sediments with minor thickness in the southern zone of the basin increasing

hasta llegar a 1.000 m de potencia al este de Tiquipaya. (Fig. 13).

La curva de 800 m señala la zona de mayor potencia, la misma que abarca la zona de Taconi, Pandoja, El Paso y áreas cercanas.

En el borde norte en el límite entre los materiales cuaternarios y las rocas del basamento, no ha sido posible calcular el espesor del material de relleno, debido principalmente a la poca penetración vertical ocasionada por la alta resistividad de los materiales, o por el bajo contraste con las rocas del basamento.

El mapa isopáquico (Fig. 13) indica la presencia de una suave elevación del basamento en la zona de Vinto-Montecato (NO de Vinto) hasta una profundidad de 400 m bajo superficie, la cual sería la prolongación de las rocas que afloran en el cerro Caramarca (SE de Vinto).

towards the north until they reach 1,000 m of thickness east of Tiquipaya (Fig. 13).

The 800 m curve indicates the zone with the greatest thickness, that covers the sector of Taconi, Pandoja, El Paso and areas nearby.

Along the northern edge, at the limit between the quaternary materials and the basement rocks, it has not been possible to calculate the thickness of the filling. This is mainly due to little vertical penetration caused by the high resistivity of the materials, or by the small contrast with the rocks of the basement.

The map of isopachs (Fig. 13) indicates the presence of a soft elevation of the basement in the area of Vinto- Montecato (NW of Vinto) up to a depth of 400 m below the surface. The elevation is an extension of the rocks which crop out in the Caramarca mountain (SE of Vinto).

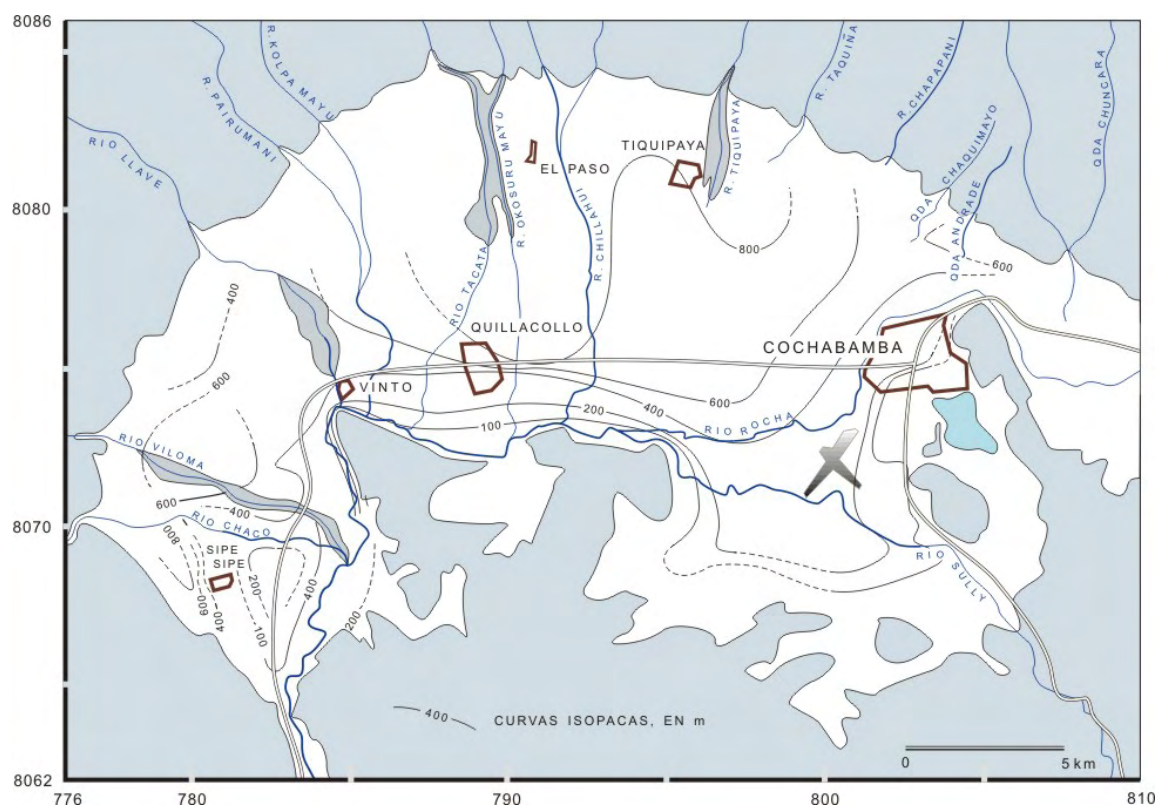


Fig. 13: Mapa de la potencia del relleno plio-cuaternario elaborado por el PIRHC (GEBOL - NNUU, 1978) / Map of the thickness of the pliocene- quaternary filling, produced by the PIRHC (GEOBOL - UN, 1978)

También se puso en relieve que la superficie del basamento paleozoico presenta escalonamientos, suaves en algunos casos, que reflejan la estructura de la fosa tectónica.

4.2.3 Análisis

Los datos de sondeos geoelectricos obtenidos durante el Proyecto PIRHC (GEBOL - NNUU, 1978) en la cuenca de Cochabamba, dieron informaciones valiosas sobre la estructura de la cuenca, y en parte sirvieron de base para la interpretación y preparación del informe geofísico del Proyecto CABAS.

Sin embargo, muchos de los datos de medición no son satisfactorios desde el punto de vista de las posibilidades actuales de medición. En parte, la variación de los valores individuales de medición alrededor de la curva de sondeo es bastante grande, lo que causa la incertidumbre en la determinación del modelo de capas correspondientes. En algunos casos, la evaluación de la profundidad del basamento se basa en una única medición.

4.3 Investigación geofísica por el Proyecto CABAS

En el marco del Proyecto CABAS se llevó a cabo una serie de sondeos geoelectricos. Estos fueron distribuidos sobre 7 perfiles de 5-10 km de longitud cada uno, perpendiculares al eje del valle (Fig. 14).

La distancia media entre los puntos de medición es de aprox. 0,8 km. En total, se llevaron a cabo 46 mediciones de sondeo en la configuración Schlumberger. Para obtener una gran profundidad de detección, la media distancia máxima de los electrodos de corriente (AB/2) generalmente era de 1.000 m, en algunos casos hasta 2.300 m.

Los perfiles son designados por las letras A, B, C, D, G, H y K. Los sondeos son denominados como sigue: "A01", donde, A indica el perfil A y 01 el número de sondeo (Fig. 14).

Equipos

El equipo geoelectrico utilizado para las mediciones (construido por el Instituto Federal de Geociencias y Recursos Naturales de Alemania, BGR) tiene una elevada potencia de transmisión (800 W), y una gran sensibilidad y exactitud del amplificador de medición. Se pueden medir voltajes hasta de pocos μV con bajo porcentaje de error. De este modo, las curvas obtenidas pueden ser

The study also highlights the fact, that the Paleozoic basement sometimes has a soft stairlike surface, which reflects the structure of the tectonic graben.

4.2.3 Data analysis

The data of the resistivity surveys obtained during the PIRHC- Project (GEBOL - UN, 1978) in the basin of Cochabamba, provided valuable information regarding the structure of the basin. The data also served as a valuable reference during the interpretation and preparation of the geophysical report of the CABAS- Project.

However, much of the data of measurement are not satisfying from the point of view of current measurement technologies. Part of the problem is, that the variation of the individual values of measurement around the curve of survey is quite large which, causes uncertainty in the determination of the corresponding strata- model. In some cases, the evaluation of the depth of the basement is based on only one single measurement.

4.3 Geophysical research by the CABAS- Project

Within the framework of the CABAS- Project, a series of geoelectric soundings was carried out. These were distributed into seven profiles, each 5-10 kms long and, each perpendicular to the axis of the valley (Fig. 14).

The average distance between measuring points is approx. 0.8 kms. In sum, a total of 46 measurements were carried out with the Schlumberger- configuration. To obtain a great depth of detection, the average maximum distance of the electrodes (AB/2) generally was 1,000 m, in some cases it reached 2,300 m.

The profiles are designated by the letters A, B, C, D, G, H and K. An example of a sounding designation is "A01", where "A" stands for profile "A" and "01" for the number of sounding (Fig. 14).

Equipment

The geoelectric equipment used for the measurements (built by the Federal Institute of Geosciences and Natural Resources of Germany, BGR) has a high transmission power (800 W), and a measuring amplifier of fine sensitivity and accuracy. Voltages even of some few μV can be measured with a low percentage of error. This way, the obtained curves can be consid-

consideradas mas confiables que en las mediciones del PIRHC (GEBOL - NNUU, 1978).

Evaluación

Las curvas han sido obtenidas mediante una aproximación iterativa a los valores registrados. El cálculo se basa en la suposición de que se puede considerar el subsuelo en la cercanía del punto de sondeo como capas aproximadamente horizontales. En muchos casos, esta suposición se cumple suficientemente bien en los sedimentos. Sin embargo, las inhomogeneidades en las capas superiores aparecen como alteraciones en las curvas.

Es típico para el método de medición y evaluación del sondeo eléctrico que combine las capas individuales existentes en la naturaleza (capas relativamente delgadas) en paquetes de capas más gruesas. Por ser anisótropas, el espesor calculado suele ser demasiado grande. Para compensar este error en cierta medida, las profundidades calculadas de los límites de capas en las evaluaciones presentes fueron reducidas en un 10%.

ered more reliable than the measurements of the PIRHC (GEOBOL - UN, 1978).

Evaluation

The curves have been obtained through an iterative approximation of the registered values. The calculation is based on the assumption that the subsoil near the point of sounding has approximately horizontal strata. In many cases, this assumption is complied well enough in the sediments. However, the inhomogeneities in the upper strata appear as alterations in the curves.

It is typical for the measuring method and the evaluation of the electric survey that combines the existing individual strata in nature (relatively thin strata) into thicker groups of strata. Because of the anisotropy of these groups, the calculated thickness yields a value which is too high. To compensate for this error, the calculated depths of the strata limits in the present evaluations were reduced by 10%.

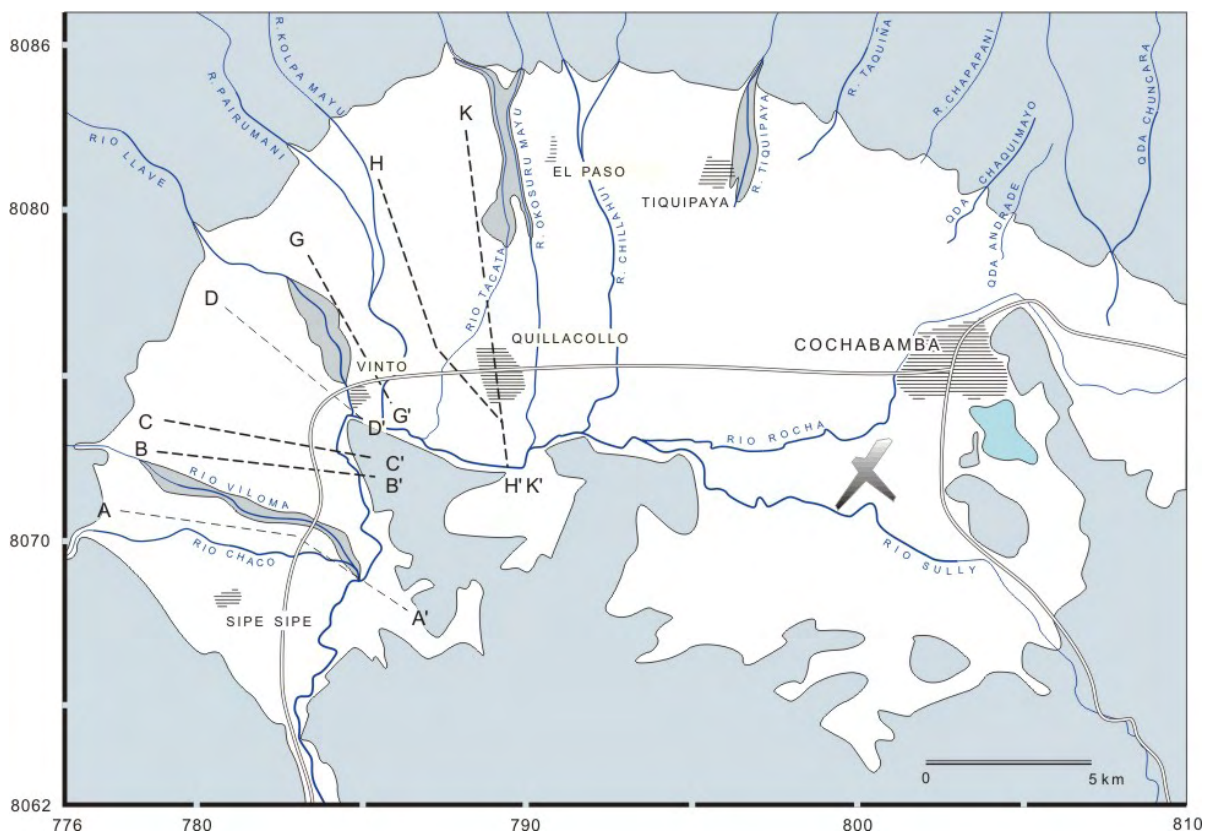


Fig. 14: Ubicación de sondeos eléctricos verticales y perfiles geoelectrónicos efectuados por CABAS (Fielitz et al., IT CABAS N°8, 1992) / Location of vertical resistivity surveys and geoelectric profiles carried out by CABAS (Fielitz et al., IT CABAS N°8, 1992)

4.3.1 Representación de los datos en corte transversal

Los resultados de las mediciones de sondeo son visualizados en cortes transversales. CABAS ha optado por la presentación de los datos mediante *isolíneas de resistividad*. Esta forma de presentación tiene ciertas ventajas sobre la presentación usual, que implica una correlación de horizontes con valores parecidos y por lo tanto incluye una interpretación previa a la graficación.

Con la visualización de *isolíneas de resistividad*, los cambios de resistividad en el gráfico no necesariamente tienen que indicar el límite de una unidad (formación) geológica, sin embargo, en muchos casos lo hacen.

En resumen, la presentación de *isolíneas* da una imagen de la distribución de resistividades del subsuelo, tal como se las midió sin incluir criterios subjetivos de interpretación.

Para la visualización en cortes transversales, los resultados de los sondeos individuales han sido modificados de tal manera que los cambios de resistividad entre las capas detectadas no son considerados abruptos, sino más bien lineales cerca de los límites entre las capas. En muchos casos tal cambio menos abrupto de las resistividades podría incluso representar mejor las condiciones reales.

La distancia relativamente grande de los puntos individuales de sondeo y el método de interpolación hacen que superficies limítrofes inclinadas entre las unidades geológicas son representadas en forma escalonada (por ejemplo, el límite superior del basamento en el corte A – A' en la Fig. 15). Obviamente, en la siguiente interpretación, los límites escalonados tienen que ser convertidos en formas que tengan sentido geológico.

Como el método del sondeo geoelectrico no puede separar capas muy delgadas, es obvio que el rango de resistividades representado en las vistas de corte no debe ser entendido como capas homogéneas. Un área de una elevada resistividad debe ser considerada como un paquete de capas con frecuentes capas de granos gruesos, pero que también contiene una cantidad más reducida de capas con granos finos. Igualmente, una región con resistividades reducidas representa un paquete de capas de granos finos, donde no se excluye la posibilidad de capas intermedias de granos gruesos.

En el Valle de Cochabamba sólo se interpretan diferencias de resistividad en base a diferencias litológicas; no se toman en cuenta influencias de la conductividad del agua subterránea. Esto parece justificarse por las investi-

4.3.1 Visualization of the data in cross-sections

The results of the sounding are presented in cross-sections. The data are visualized using isolines of resistivity. This type of presentation has certain advantages over the usual presentation, which assumes a correlation of horizons with similar values and therefore includes an interpretation of the data prior to the visualization.

The presentation of data using isolines means that the layers of different resistivity do not necessarily indicate physical / geological layers, even though they often do.

To sum up, the presentation of isolines offers a view of the distribution of resistivity of the underground as it was measured, excluding any subjective criteria of interpretation.

In the graphic representations in the cross-sections, the results of the individual soundings have been modified so that the changes of resistivity between the detected strata are not considered abrupt, but rather linear near the limits between the strata. In many cases, this less abrupt change of the resistivity might even be a more accurate representation of real conditions.

The relatively large distance between the individual sounding points and the method of interpolation cause the limits between areas of different resistivities to appear as step-like shapes (for example, the upper limit of the base in the profile A - A' in the Fig. 14). Obviously, in an eventual interpretation, the limits have to appear in a way that make geological sense.

Since the method of the geoelectric survey cannot separate very thin strata, the range of resistivity represented in the graphs of the profile must obviously not be misunderstood as homogeneous strata. An area of a high resistivity must be considered to be a package of combined strata with frequent coarse-grained layers, that also contains a reduced quantity of fine-grained strata. Equally, a region with reduced resistivity represents a package of fine-grained strata, where the existence of middle to coarse-grained strata cannot be dismissed.

In the Cochabamba Valley, differences of resistivity are interpreted only as lithological differences; differences of conductivity within the groundwater are not taken into account. This approach seems reasonable,

gaciones previas, que no dieron grandes diferencias en la conductividad eléctrica del agua.

Capas inferiores, con resistencias mayores a 150 ohm, generalmente fueron interpretadas como basamento. Esta asignación no es completamente exclusiva, ya que obviamente también hay sedimentos con tales resistividades en la región investigada. En las regiones donde no hay grandes contrastes de resistividades a una mayor profundidad, la determinación de la profundidad del basamento no es segura.

Sección A - A' (Fig. 15)

La sección A - A' pasa en dirección oeste-este, ubicada en la parte suroeste, es decir, la parte inferior del Valle de Cochabamba (Fig. 15).

En la parte derecha del corte (Fig. 15) se observa a una profundidad de 100 a 300 m una región con elevadas resistividades. Esto probablemente indica la posición del basamento paleozoico.

because, previous research did not indicate large differences in the electrical conductivity of water across most of the area.

Lower layers, with resistances grater than 150 ohm, generally are interpreted as basement. This assignment is not always true, because obviously there are also sediments with similar resistivities in the investigated region. In the regions without large contrasts of resistivity at a greater depth, the determination of the depth of the basement is not reliable.

Section A - A' (Fig. 15)

The section A - A' is located in west-east direction, located in the southwestern part, that is in the lowest part of the Cochabamba Valley (Fig. 15).

In the right part of the profile (Fig. 14), there is a region with high resistivity which has a depth of 100 to 300 m. This probably indicates the position of the Paleozoic basement.

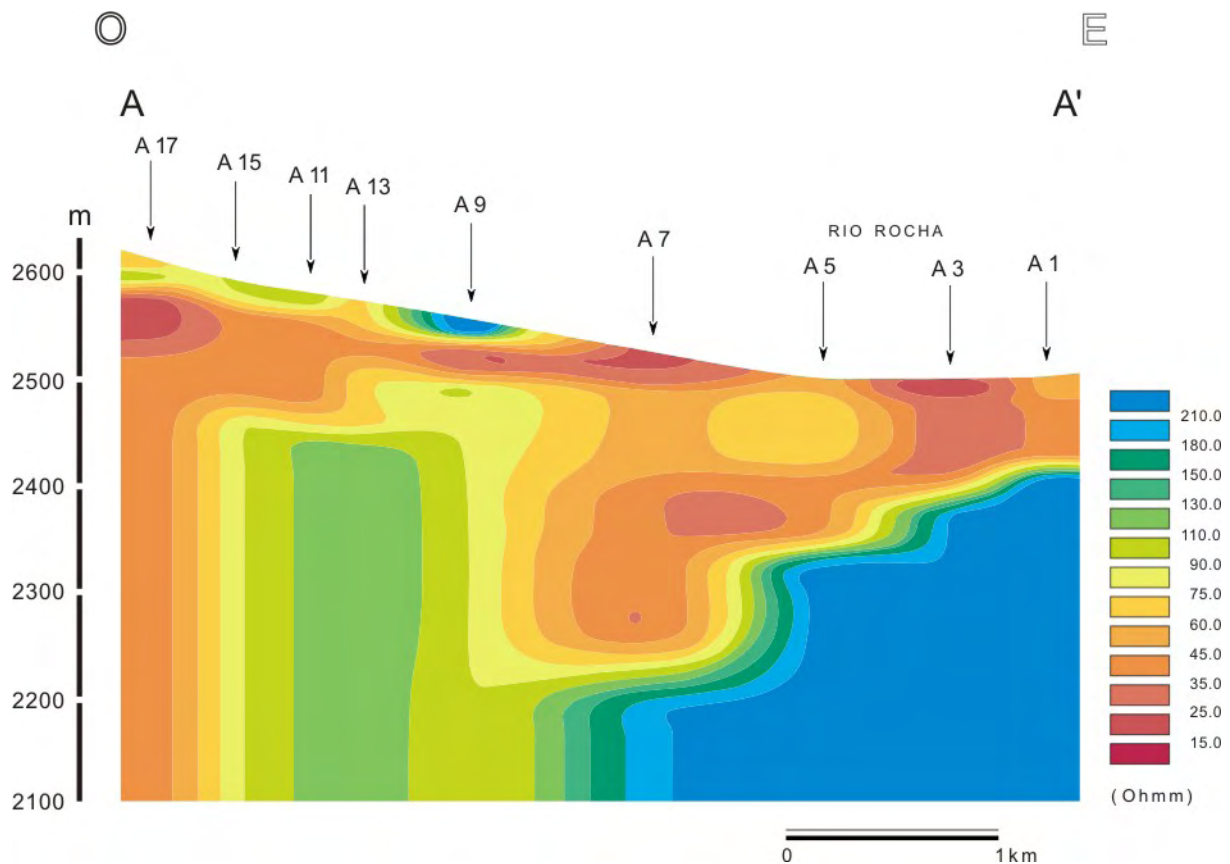


Fig. 15: Corte geoelectrico A – A' (Fielitz et al., IT CABAS N°8, 1992) / Geoelectric profile A - A' (Fielitz et al., IT CABAS N°8, 1992)

Sobre el basamento hay sedimentos con resistividades relativamente bajas (entre naranja y amarillo, aprox. 25-75 ohm m). Se pueden observar resistividades parecidas, igualmente bajas, en las capas superiores de toda la vista en corte. Aquí llama la atención (en comparación con las otras vistas en corte) que las resistividades relativamente bajas en la parte oeste del corte van hasta grandes profundidades. La mayor ocurrencia de resistividades bajas en los sedimentos probablemente debe ser interpretada en el sentido que aquí, durante un tiempo prolongado, se acumularon materiales de granos finos.

En los puntos de sondeo A11 y A13, se observan resistividades relativamente elevadas (110-130 ohm m) a partir de los 130 m de profundidad. Este fenómeno probablemente tiene que ver con una elevación del basamento, ya que cerca de A11 se puede observar una afloramiento de rocas paleozoicas (Fig. 15).

Sección B - B' (Fig. 17)

La sección B - B' pasa aprox. a 2 km al norte de la sección A - A', igualmente en dirección oeste-este, también en la parte inferior del Valle de Cochabamba.

Above the basement lie sediments with relatively low resistivity (between orange and yellow, approx. 25-75 ohm m). Equally low resistivities can be observed in the upper strata across the entire profile. This profile is noteworthy (when compared to the others), because relatively low resistivities in the western part of the section reach down to considerable depths. The greater recurrence of low resistivity in the sediments probably means that fine-grained materials were accumulated here during prolonged periods of time.

In the sounding points A11 and A13, relatively high resistivities can be observed (110-130 ohm m) starting from 130 m of depth. This phenomenon probably has something to do with an elevation of the basement, related to an outcrop of the paleozoic rocks near A11 (Fig. 15).

Section B - B' (Fig. 17)

The section B - B' passes approx. at 2 kms north of the section A - A'. It also runs in west-east direction and through the lower part of the Valley of Cochabamba.

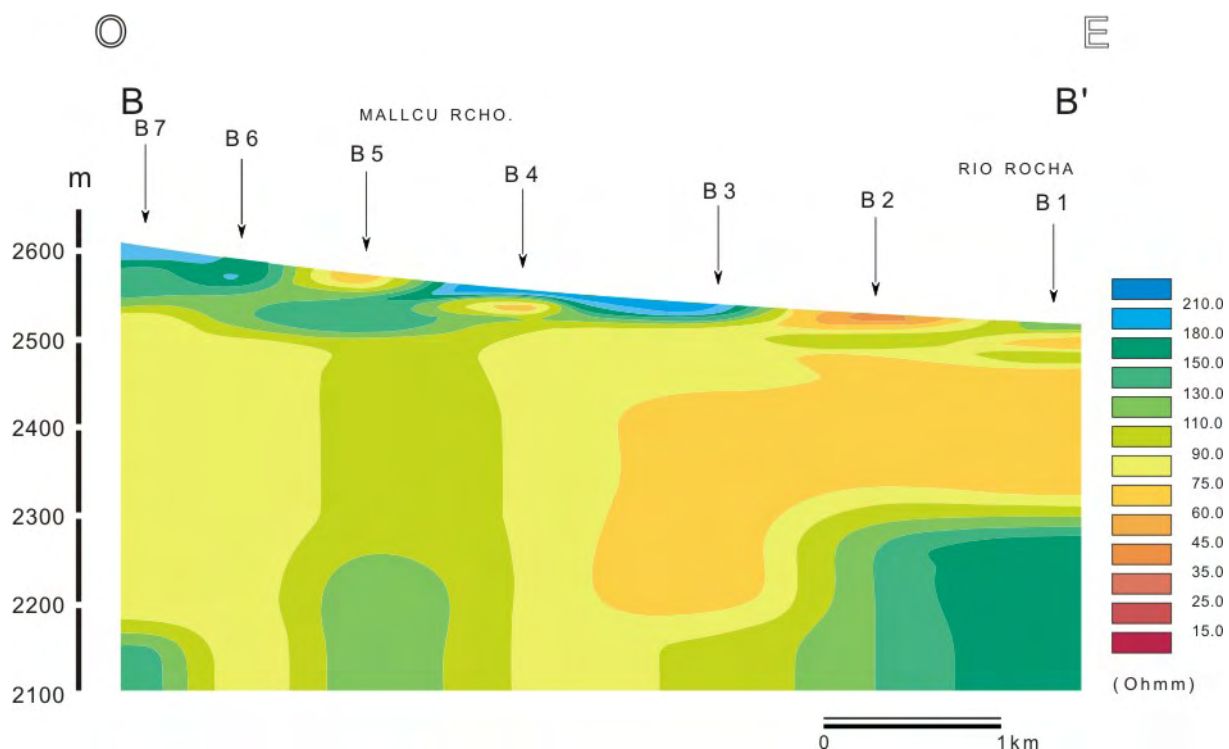


Fig. 16: Corte geoelectrico B – B' (Fielitz et al., IT CABAS N°8, 1992) / Geoelectric profile B - B' (Fielitz et al., IT CABAS N°8, 1992)

Los contrastes de las resistividades en toda la vista de corte son relativamente reducidos. Son comunes resistividades entre 60 y 110 ohm.

En la parte oeste del perfil se observa resistividades elevadas hasta cerca de la superficie. Esto tiene que ver, por una parte, con el hecho que las capas arenosas encima del nivel del agua subterránea tienen resistividades elevadas. Por otra parte, aquí obviamente se ha depositado material de granos gruesos que proviene de las laderas del oeste con elevadas resistividades aún cuando están saturado con agua.

En la parte derecha del cuadro en profundidad nuevamente hay una región con una resistividad elevada, que debe ser interpretada como basamento. El basamento llega a la superficie aproximadamente a unos 600 m al este del punto de medición B1.

Debajo del punto de sondeo B5, en una profundidad relativamente grande, se pueden observar resistividades ligeramente mayores. Sin embargo, no hay mucho contraste con las capas superiores, de modo que aquí no se puede hacer una afirmación segura sobre la profundidad del basamento.

The contrasts of the resistivities in the whole profile are relatively small. They lie between 60 and 110 ohm.

In the western part of the profile, high resistivities can be observed even near the surface. This is caused on the one hand, by the fact that the sandy strata lying above the groundwater level have high resistivities. On the other hand, by the fact that coarse grained materials coming from the slopes in the west have high resistivities even when saturated with water.

In the right part of the picture, there is another region of high resistivity in depth, which must be interpreted as basement. The basement reaches the surface approximately at 600 m east of the measuring point B1.

Under B5, in a relatively great depth, slightly higher resistivities can be observed. These, however, do not contrast with resistivities of the upper strata. A sound conclusion regarding the depth of the basement cannot be drawn as a result.

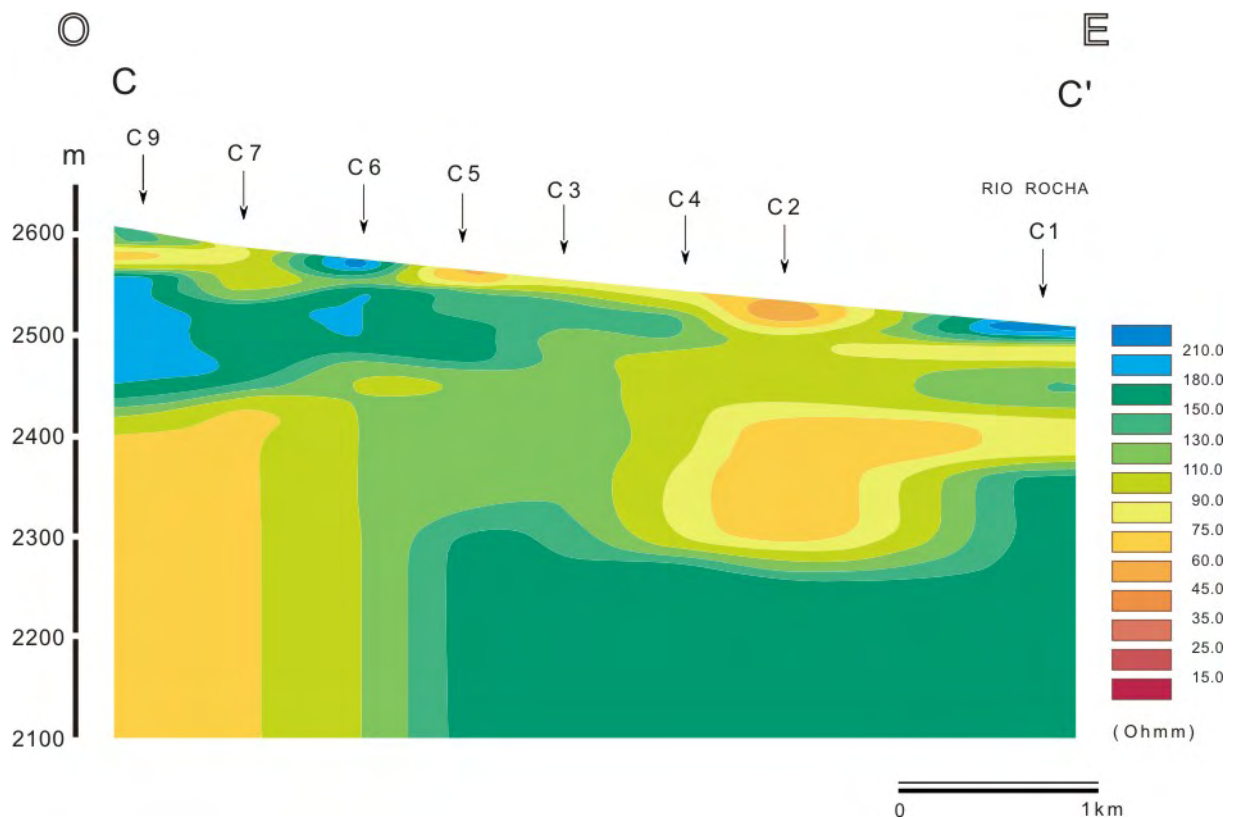


Fig. 17: Corte geoelectrico C – C' (Fielitz et al., IT CABAS N°8, 1992) / Geoelectric profile C - C' (Fielitz et al., IT CABAS N°8, 1992)

Sección C - C' (Fig. 17)

Esta sección está aproximadamente a 1 km de la sección B - B', tiene dirección oeste-este.

En la parte oeste de la sección, en las capas superiores se puede observar resistividades relativamente elevadas, que deben ser explicadas por la existencia de sedimentos de granos gruesos que fueron transportados de las laderas al oeste. Tanto su espesor como su resistividad disminuyen hacia el este.

En la parte este del cuadro, en la profundidad se observa un área con resistividades mayores a los 150 ohm. Esto probablemente debe ser interpretado como basamento. Sin embargo, debajo de los puntos de medición C3 y C5, el contraste de resistividad con las capas superiores es tan reducido, que es insegura la posición del límite superior del área de elevada resistividad (Fig. 17).

Sección D - D' (Fig. 18)

Esta sección pasa en dirección noroeste-sureste por el Valle de Cochabamba. Cerca de Vinto se encuentra con una estribación de la serranía del sur.

Profile C - C' (Fig. 17).

This section lies approximately 1 km from the section B - B' and has a west-east direction.

In the western part of the section, in the higher strata, relatively high resistivities can be observed. This must be explained by the existence of coarse-grained sediments, coming down from the slopes in the west. Their thickness as well as their resistivity decreases towards the east.

In the eastern part of the graph, in depth, an area with resistivities higher than 150 ohm is observed. This probably has to be interpreted as basement. However, under the measuring points C3 and C5, the contrast of resistivity with the upper strata is so low, that the location of the upper limit of the area of high resistivity cannot be deduced (Fig. 17).

Section D - D' (Fig. 18).

This section runs from northwest to southeast through the Valley of Cochabamba. Near Vinto it cuts through the foothills of the southern mountain range.

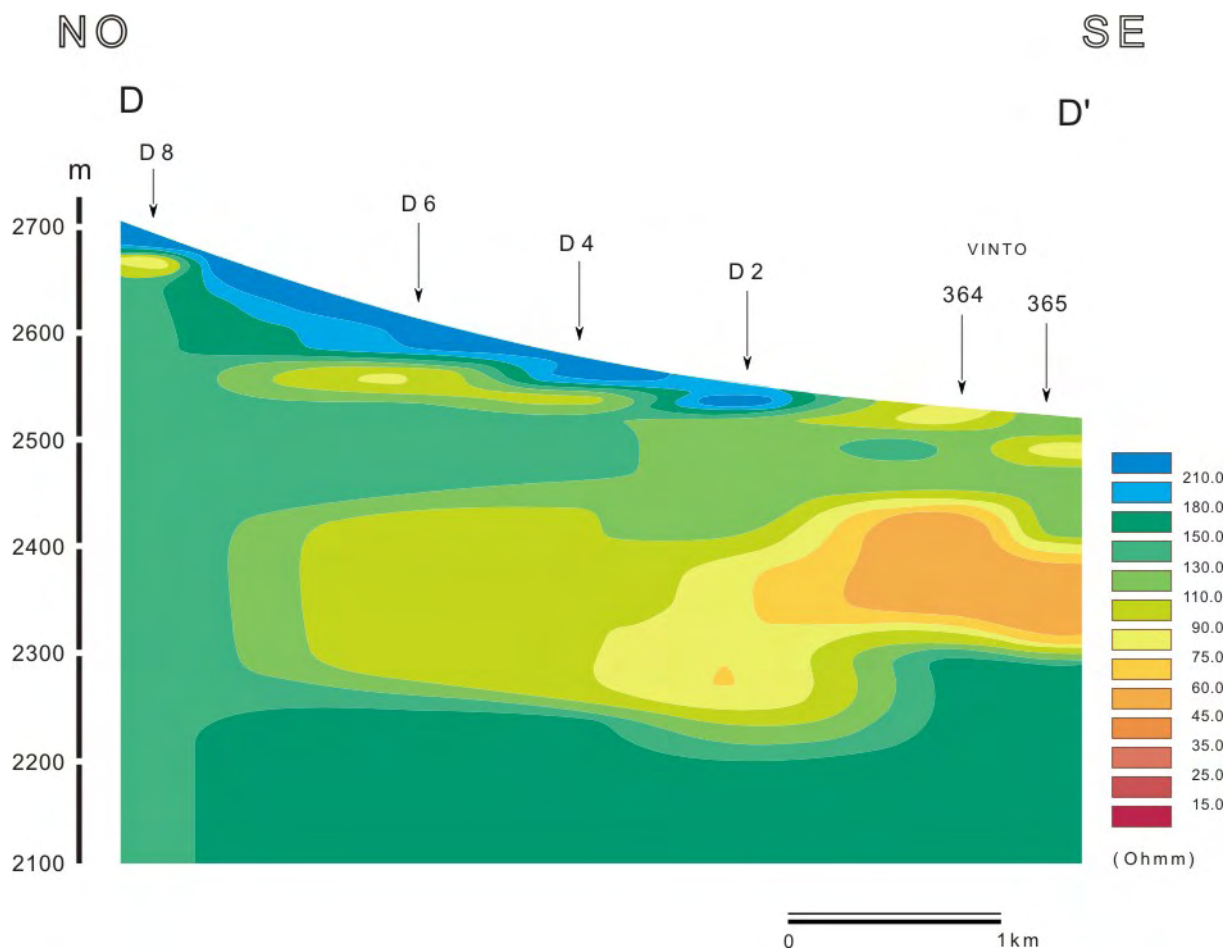


Fig. 18: Corte geoelectrico D - D' (Fielitz et al., IT CABAS N°8, 1992) / Geoelectric profile D - D' (Fielitz et al., IT CABAS N°8, 1992)

De una manera semejante como en la sección anterior, también aquí en la parte noroeste hay elevadas resistividades en las capas superiores que indican la presencia de sedimentos de granos relativamente gruesos. El grosor de estas capas y sus resistividades disminuyen hacia el sureste.

También las capas de profundidad mediana tienen resistividades que disminuyen del noroeste al sureste.

La resistividad uniforme debajo del punto de sondeo D8 probablemente debe ser interpretada como una alternancia entre resistividades elevadas y resistividades menores. El método de medición no tiene suficiente resolución como para detectar estas alteraciones, y las representa como una resistividad promedio.

El área con resistividades por encima de los 150 ohm m en la profundidad probablemente debe ser interpretada como basamento (ver introducción cap. 4.1), el cual aflora aproximadamente a 500 m al sureste del punto de sondeo 365 (Fig. 18).

In a similar way as in the previous section, high resistivities in the upper strata of the northwestern part indicate the presence of relatively coarse-grained sediments. The thickness of these strata and their resistivities decrease towards the southeast.

The strata of medium depth also have resistivities which decrease from northwest to southeast.

The uniform resistivity under the measuring point D8 ought to be interpreted as the result of alternating high resistivity and low resistivity areas. The measurement method does not have sufficient resolution to detect this alternation, and represents it as an average resistivity.

The area with resistivities above the 150 ohm m in depth probably must be interpreted as basement (see introduction ch. 4.1). the basement crops out approximately at 500 m southeast of the sounding point 365 (Fig. 18).

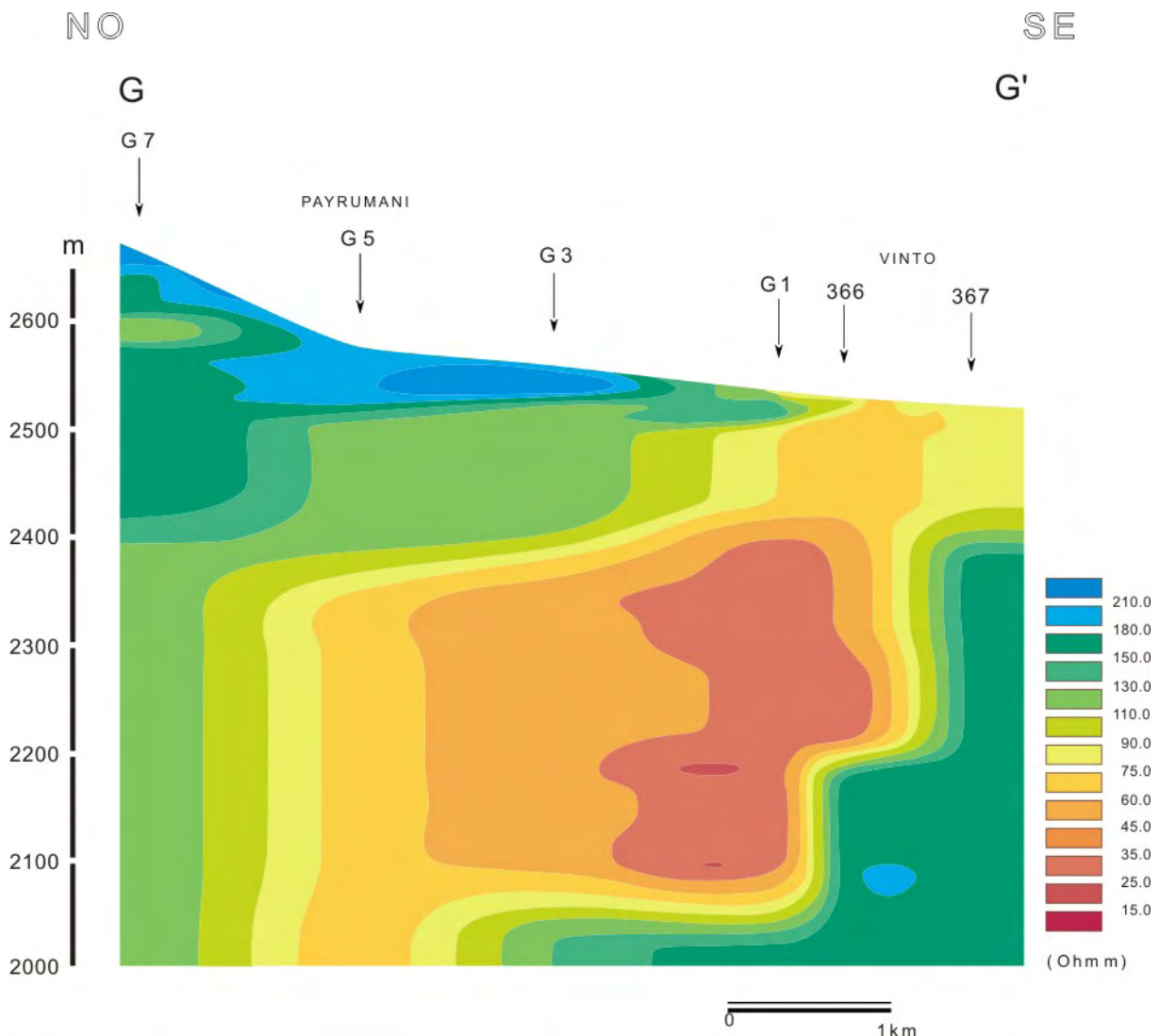


Fig. 19: Corte geoelectrico G – G' (Fielitz et al., IT CABAS N°8, 1992) / Geoelectric profile G - G' (Fielitz et al., IT CABAS N°8, 1992)

Sección G - G' (Fig. 19)

Esta sección también pasa por el valle en dirección no- roeste-sureste. En sus características generales, éste corte coincide con los anteriores. Sólo las magnitudes de los valores de resistividad y el espesor de las napas varían.

Nuevamente, en las capas superiores en el borde no- roeste hay elevadas resistencias, interpretadas como sedimentos de granos gruesos. Debajo del punto G7, son mas pronunciadas que en los perfiles anteriores.

Tanto en profundidades mayores como medianas, las resistencias disminuyen casi continuamente hacia el sureste. Esto parece factible, puesto que los sedimentos provinieron principalmente de las montañas más elevadas en el noroeste o en el norte y los materiales de granos finos fueron transportados más lejos que los de granos gruesos.

La región de elevadas resistividades en profundidades medianas y grandes en el borde sureste es interpretada como basamento. Aproximadamente a 500 m al sureste del punto 367, rocas paleozoicas llegan a la superficie.

Section G - G' (Fig. 19)

This section also passes through the valley in north- west-southeast direction. In its general characteristics, this profile matches with the previous ones. Only the magnitudes of the values of resistivity and the thickness of the layers vary.

Again, resistivities in the upper strata along the north- western edge are interpreted as coarse- grained sedi- ments. Below the point G7, these are more pronounced than in the previous profiles.

In greater and as well in medium depths, the resistivity decreases almost continuously towards the southeast. This seems plausible, since the sediments originated mainly in the highest mountains of the northwest or in the north and the fine grained materials were trans- ported farther into the center of the valley than coarser grained material.

The region of high resistivity in medium and great depths at the southeastern edge is interpreted as base- ment. Approximately 500 m towards the southeast of point 367, Paleozoic rocks reach the surface.

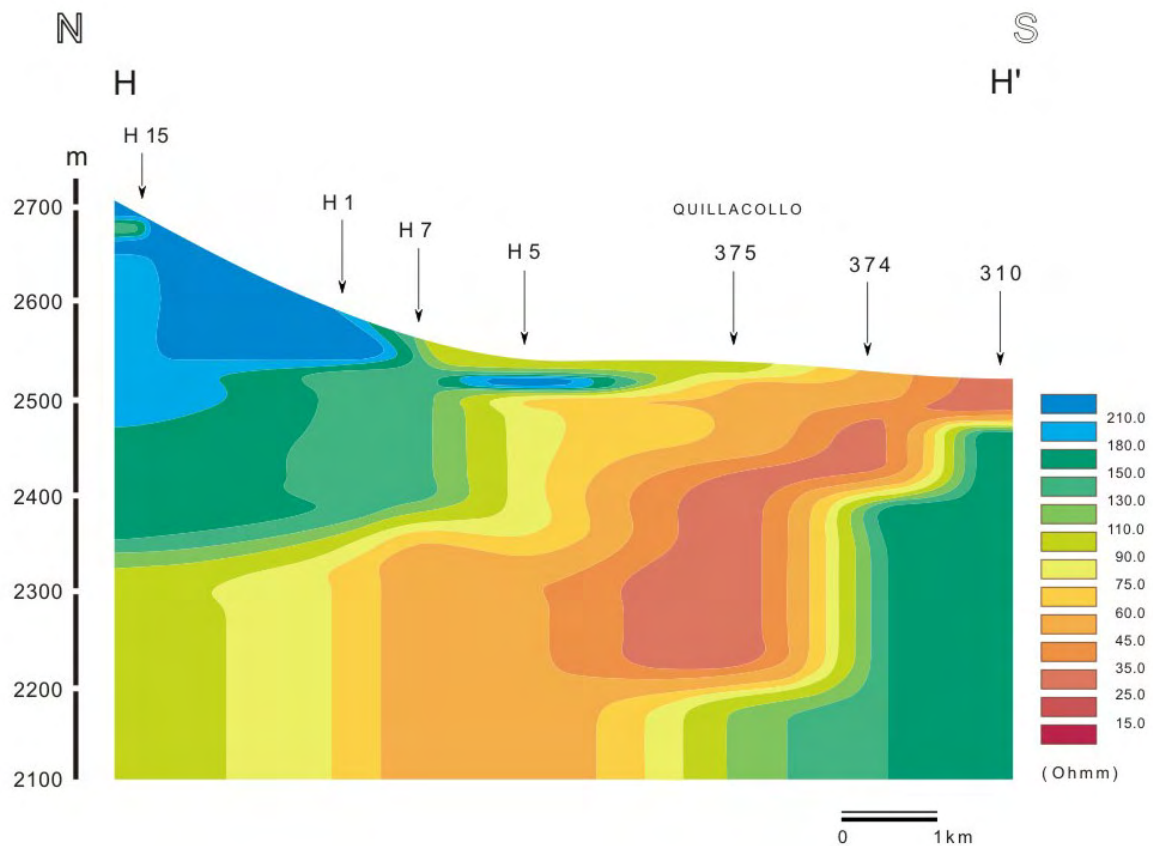


Fig. 20: Corte geoelectrico H – H' (Fielitz et al., IT CABAS N°8, 1992) / Geoelectric profile H - H' (Fielitz et al., IT CABAS N°8, 1992)

Sección H - H' (Fig. 20)

En esta sección es bastante pronunciada la existencia de capas con resistividades altas hasta profundidades medianas en la parte noroeste del perfil. El terreno en esta región también tiene un mayor declive que en los perfiles anteriores. Como en los perfiles anteriores, se observa claramente la reducción general de las resistividades del noroeste hacia el sureste.

La disminución de la resistividad hacia la profundidad en el extremo noroeste del perfil puede indicar que en las primeras etapas de la sedimentación del valle, el relleno consistía mayormente de fracciones mas finas debido al menor declive de la cordillera surgente o que los sedimentos hayan sido depositados con pobre selección.

Hay que recalcar que el nivel del agua subterránea en el extremo noroeste de este perfil, puede llegar a 40 m bajo tierra. Por lo tanto, no se puede concluir que toda la región con resistividades altas esté saturada de agua.

Las resistividades elevadas en el extremo sureste del perfil se interpretan como basamento.

Section H - H' (Fig. 20)

In this section, strata with high resistivity is quite pronounced down to medium depths in the northwestern part of the profile. The surface in this region also shows higher slopes than in the previous profiles. As in the previous profiles, a general decrease of the resistivities from the northwest towards the southeast is clearly observed.

The decrease of the resistivity towards depth in the northwestern end of the profile may indicate that in the first stages of the sedimentation of the valley the filling consisted mainly of finer fractions due to the smoother slope of the artesian range, or that the sediments have been deposited with poor selection.

The level of the groundwater in the northwestern end of this profile can reach a level down to 40 m below surface. Therefore, it can not be concluded that the whole region with high resistivities is saturated with water.

The high resistivities at the southeastern end of the profile are interpreted as basement.

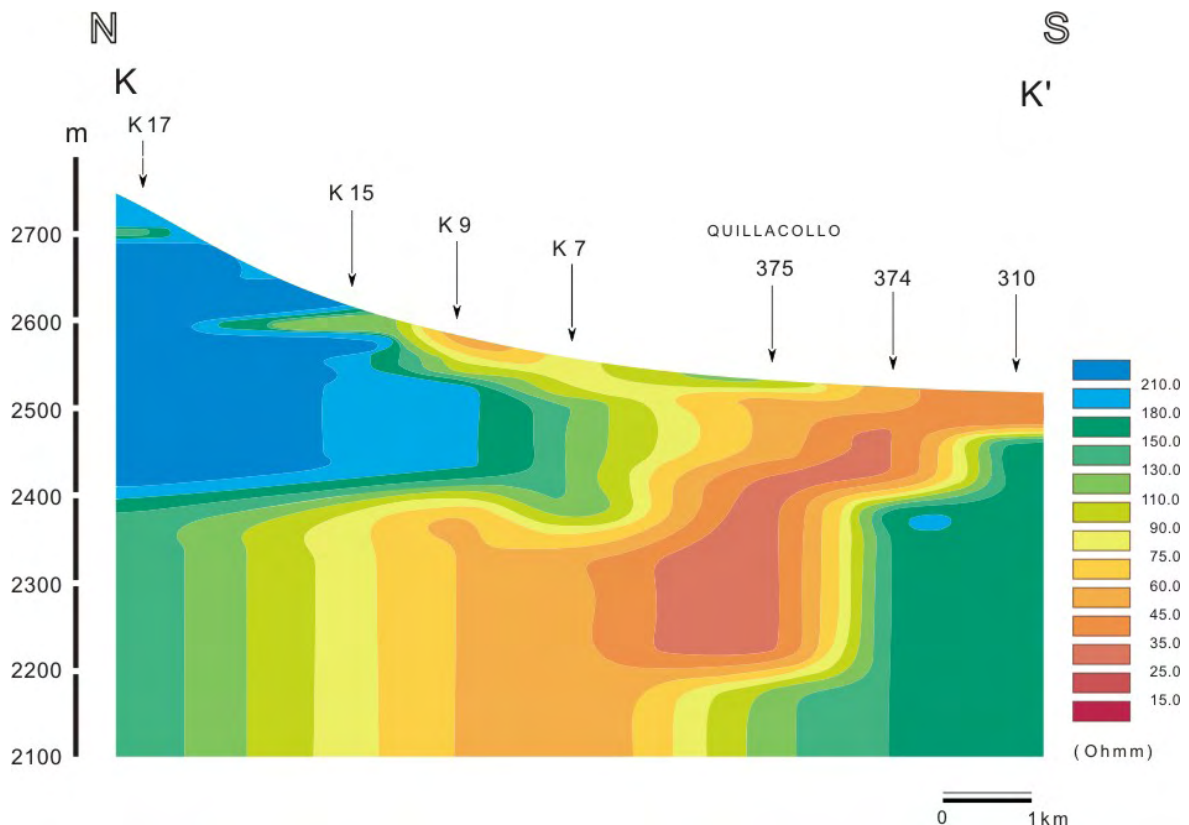


Fig. 21: Corte geoelectrico K – K' (Fielitz et al., IT CABAS N°8, 1992) / Geoelectric profile K - K' (Fielitz et al., IT CABAS N°8, 1992).

Sección K - K' (Fig. 21)

Esta sección pasa por el lado este del área investigada, cruzando el valle en dirección norte-sur. El lado sur de la sección coincide con la sección H - H'.

La existencia de capas con elevadas resistividades en el extremo norte del perfil es más pronunciada en esta sección que en todas las demás secciones. Se interpreta la distribución de resistividades de una manera similar como en las secciones G - G' y H - H'.

4.3.2 Mapa de resistencia transversal / Map of transversal resistivity.

La Fig. 22 representa isolíneas de resistencia transversal de los sedimentos no consolidados entre 50 y 200 m de profundidad, e.d. este mapa no considera el espesor completo de los sedimentos no consolidados por lo cual no coincide con el mapa presentado por el PIRHC (Fig. 12). La unidad utilizada en el mapa es 1.000 ohm m^2 .

Para elaborar este mapa se han usado datos de todos los sondeos descritos anteriormente. Con el fin de tener mayor información en el sector este de la zona estudiada, se utilizaron datos de sondeos de los perfiles 5, 6 y 7 del PIRHC (1974).

Elevadas resistividades en los sedimentos generalmente indican la existencia de materiales de granos relativamente gruesos. En las regiones donde los sedimentos no llegan a una profundidad de 200 m, obviamente la visualización sólo considera la profundidad hasta la base de los sedimentos. Siendo capas de menor espesor necesariamente de menor resistencia transversal, valores bajos de resistencia transversal pueden indicar bajas resistividades de la formación tanto como menor espesor de los sedimentos.

De esta forma, para la resistencia transversal en los bordes del valle, donde hay rocas, se obtiene el valor cero. Cerca de los bordes del valle, donde no hay valores de medición, se tenía que interpolar entre los valores de medición más cercanos y los valores para el borde del valle. La roca paleozoica que forma el borde del relleno plio-cuaternario es representado en color gris.

El mapa muestra resistividades promedias relativamente elevadas (entre verde y azul) en una región no interrumpida, que va de El Paso hasta Mallcu Rancho, en la parte norte y noroeste del valle. Hay resistividades especialmente elevadas entre El Paso y Payrumani.

Como lo muestran las vistas en corte (Fig. 15 a Fig. 21), la existencia de estas resistividades relativamente ele-

Section K - K' (Fig. 21).

This section passes along the eastern side of the study-area, crossing the valley in north-south direction. The southern side of the section matches with section H - H'.

Strata with high resistivity in the northern end of the profile are more abundant in this section than in the other ones. The distribution of the resistivities is interpreted in a similar to those of sections G - G' and H - H'.

The Fig. 22 represents isolines of transversal resistivity of the non- consolidated sediments between 50 and 200 m of depth. That means that this map does not consider the complete thickness of the non- consolidated sediments. It differs in the regard to the map presented by PIRHC (Fig. 12). The unit used in the map 1.000 ohm m^2 .

To achieve this map, data of all the soundings previously described have been used. In order to obtain more information of the eastern sector of the studied area, data of soundings of the profiles 5, 6 and 7 of the PIRHC (1974) were added to the evaluation.

Increased resistivities in the sediments generally indicate the existence of materials of relatively coarse grains. In the regions where the sediments do not reach a depth of 200 m, obviously the graphic representation only considers the depth down to the base of the sediments. Layers of minor thickness as a rule have minor transversal resistivity; low values of transversal resistivity may therefore indicate low resistivity of the formation or minor thickness of the sediments.

Along the edges of the valley, where rocks crop out, the transversal resistivity is zero. Near the edges of the valley, where no measured values exist, the values were interpolated between the nearest measured values and the values at the edge of the valley. The Paleozoic rock that forms the edge of the pliocene quaternary filling is represented in grey color.

The map shows relatively raised average resistivities (green to blue) in a region, that leads from El Paso up to Mallcu Rancho, in the northern and northwestern part of the valley. There are especially high resistivities between El Paso and Payrumani.

As shown in the profile- graphs (Fig. 15 to Fig. 21), the existence of the relatively high resistivity is related

vadas está relacionada con la ubicación de los abanicos, que avanzan al valle desde el norte y el oeste, y con carga de sobre todo material compuesto de bloques y gravas. La región de las resistividades especialmente elevadas al oeste de El Paso coincide aproximadamente con la ubicación de los abanicos holocénicos de zona (Mapa 2).

Hacia el sur (Quillacollo, Sipe Sipe) y hacia el este (Tiquipaya), las resistividades medias se reducen claramente. Aquí, obviamente, por diferentes razones hay materiales depositados de granos finos, limos y arcillas, que en términos generales tendrán menos permeabilidad hidráulica. Los valores reducidos en el noroeste son ocasionados por la cercanía de las rocas duras del paleozoico.

to the location of the fans, that advance into the valley from the north and the west, and consist basically of blocks and gravels. The region of especially high resistivity in the west of El Paso matches approximately the location of the Holocene fans of the area (Map 2).

Towards the south (Quillacollo, Sipe Sipe) and eastwards (Tiquipaya), the average resistivities are clearly reduced. Here, for different reasons there are materials of fine grains, muds and clays, which generally have less hydraulic permeability. The reduced values in the northwest are caused by the proximity of the hard rocks of the Paleozoic.

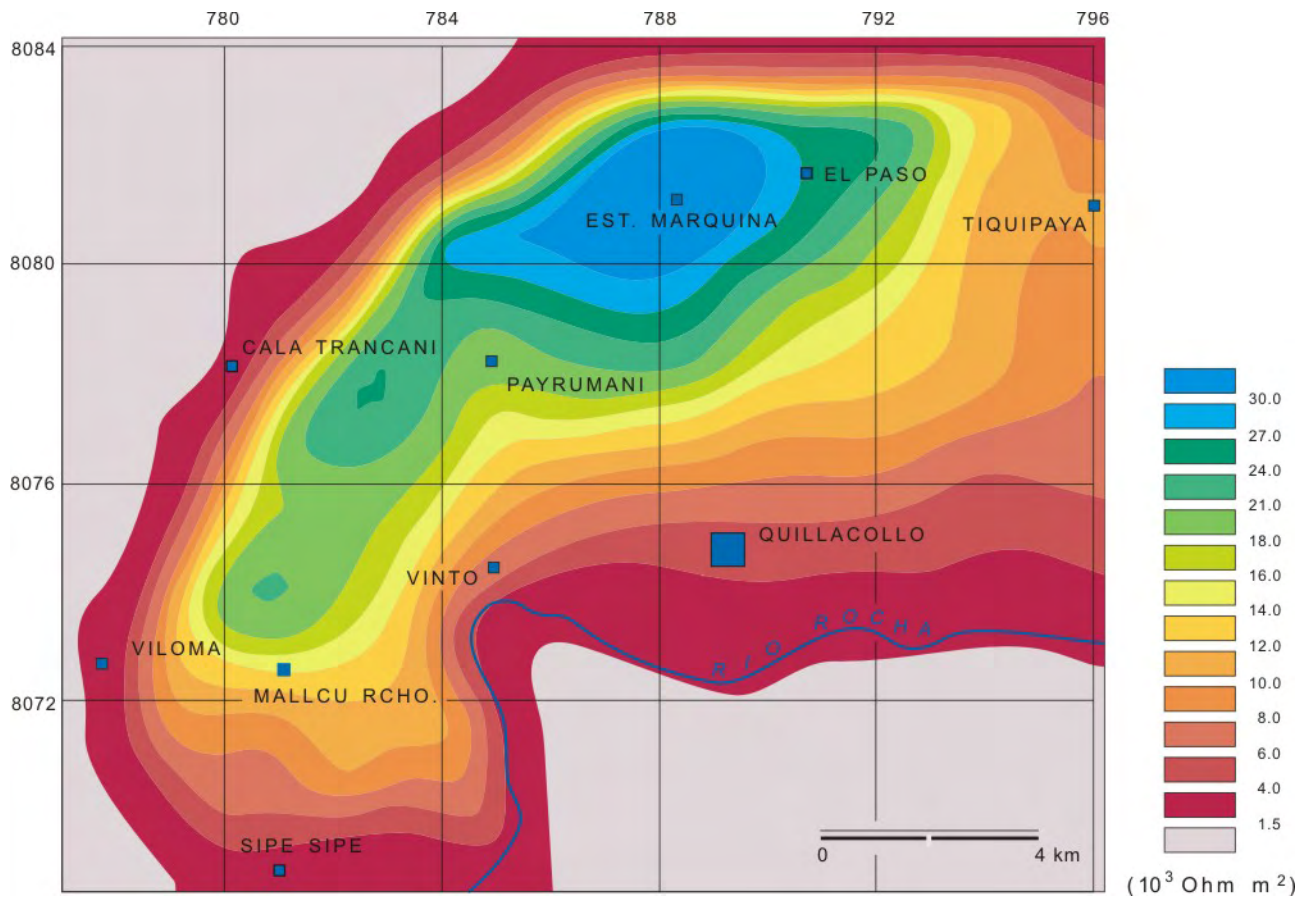


Fig. 22: Mapa de resistencia transversal de sedimentos cuaternarios entre las profundidades de 50 y 200 m / Map of transverse resistivity of quaternary sediments between the depths of 50 and 200 m

4.3.3 Profundidad del basamento

Con respecto a la profundidad del basamento, en general los resultados anteriores en el marco del PIRHC fueron confirmados. En la parte norte de la región investigada, todo el basamento baja de sur a norte, y finalmente llega a profundidades de más de 600 m. Cerca de Vinto aparentemente hay un umbral del basamento que llega a aproximadamente 2.000 m s.n.m.. En la parte sur de la región investigada hay grandes diferencias en la profundidad hasta el basamento. Determinaciones exactas no han sido posibles por la incertidumbre en la diferenciación entre basamento y posibles sedimentos de resistividades elevadas en mayores profundidades.

4.3.3 Depth of the basement

Regarding the depth of the basement, the previous results within the framework of the PIRHC were generally confirmed. In the northern part of the investigated region, all the basement deepens from south to north, and finally reaches depths more than 600 m. Near Vinto apparently there is a rise of the basement that reaches approximately 2,000 m above sea level. In the southern part of the investigated region, there are big differences in the depth of the basement. Exact determinations could not be made due to the uncertain differentiation between basement and sediments with high resistivity at greater depths.

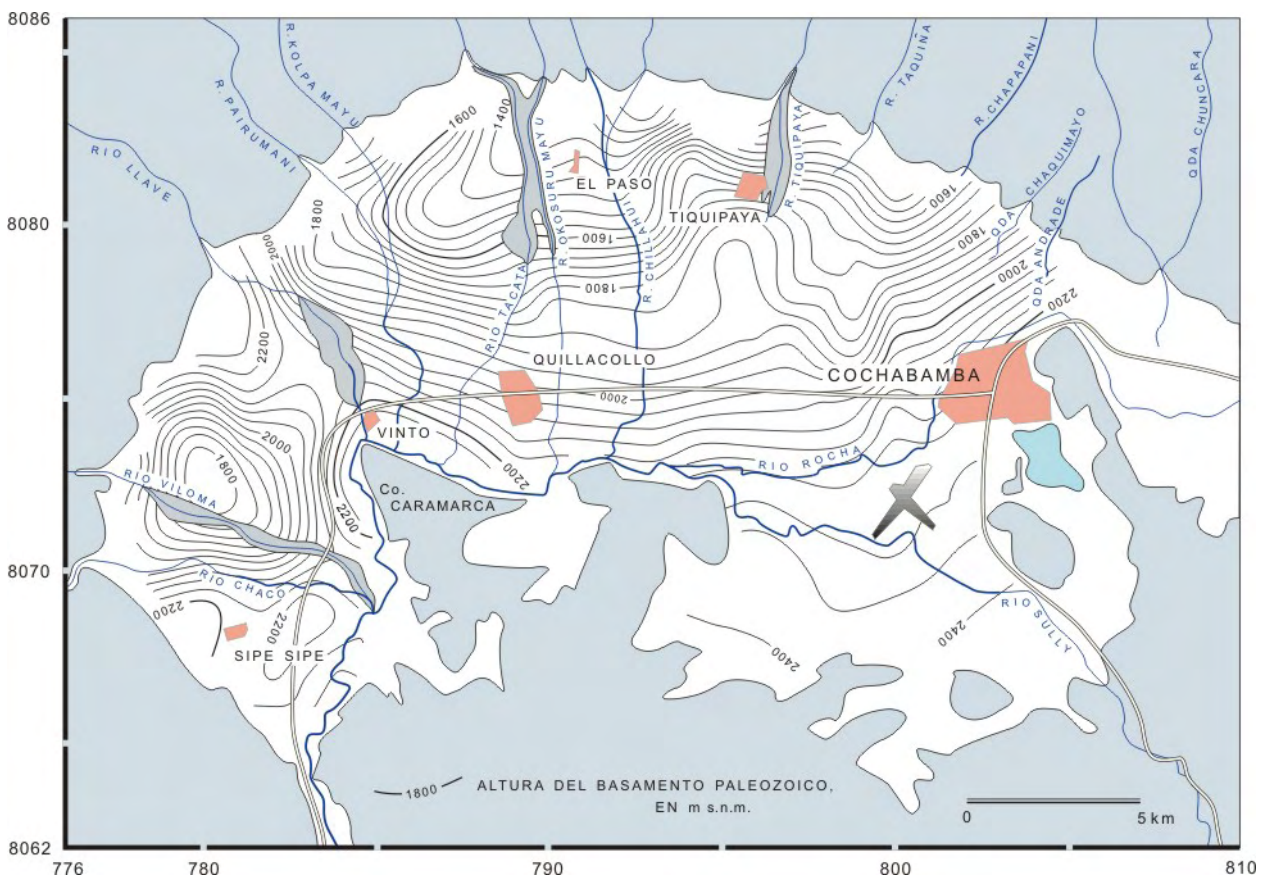


Fig. 23: Topografía del zócalo paleozoico en el Valle Central en base a sondeos audiomagnetotéluricos (SEURECA etc., 1994) / Topography of the Paleozoic basement in the Central Valley based on audiomagnetotelluric soundings (SEURECA etc, 1994)

4.4 Estudio mediante sondeos audiomagnetotéluricos por SEURECA-BRGM-SOGREAH-CGL

Posterior a la investigación geofísica del Proyecto CABAS en el año 1993, el departamento de geofísica del BRGM en el marco del proyecto de cooperación Boliviano-Francesa realizó un estudio geofísico en el valle de Cochabamba mediante sondeos audiomagnetotéluricos (AMT). Se realizaron 183 sondeos AMT registrados sobre 180 estaciones.

Entre los resultados, probablemente la contribución más importante es la determinación de las profundidades del basamento.

4.4.1 Topografía y geometría del zócalo ordovícico

Las resistividades del substrato varían generalmente de 100 a 1.000 ohm m. Estas variaciones se deben esencialmente a los cambios de facies y al estado de fracturación de la roca base.

La topografía del techo del basamento está representada en la Fig. 23. El techo del basamento atestigua un levantamiento de las altitudes cerca de Vinto, en el eje del cerro Caramarca, marcando probablemente la continuidad de las cuarcitas del ordovícico visibles sobre el cerro. Este elemento topográfico del zócalo está orientado en dirección noroeste-sureste, coincidiendo con una dirección tectónica mayor de la cuenca. Este levantamiento divide la cuenca en dos sectores, norte y sudoeste. El sector sudoeste está sobrealzado con relación al compartimiento norte.

El sector norte se extiende de Vinto hasta el este de Tiquipaya y está caracterizado por un pronunciado ahondamiento del zócalo del sur hacia el norte, produciendo profundidades que localmente exceden 1.000 m. En cambio, en la zona sur, se observa pendientes suaves que llevan a profundidades del substrato de max. 150 m (Fig. 24).

4.4.2 Relleno cuaternario de la cuenca

El cuerpo del relleno plio-cuaternario del área de trabajo es subdividido en tres sectores, el sector meridional, el sector central y septentrional y la zona suroeste de la cuenca (Fig. 24, véase también cap. 4).

Sector 1: La parte meridional del valle. Al sur y al oeste del aeropuerto las resistividades medidas son

4.4 Investigations using audiomagnetotelluric soundings by SEURECA-BRGM-SOGREAH-CGL

Following the geophysical research of the CABAS Project in 1993, the department of geophysics of the BRGM within the framework of the Bolivian-French cooperation- project, carried out a geophysical study in the valley of Cochabamba using audiomagnetotelluric soundings (AMT). They carried out 183 AMT soundings registered on 180 stations.

Among the results, is probably the most important contribution the relatively exact determination of the depths of the basement.

4.4.1 Topography and geometry of the Ordovician Basement

The resistivities of the underground vary generally from 100 to 1,000 ohm m. These variations are essentially due to the changes of facies and the state of fracturing of the basement rock.

The topography of the basement is represented in Fig. 23. The basement rises near Vinto, in the axis of the Caramarca- hill, marking probably the continuity of the Ordovician quartzites visible on the hill. This topographical element of the basement is oriented in northwest-southeast direction, matching a major tectonic direction of the basin. This ridge divides the basin into two sectors, north and southwest. The southwestern sector is uplifted in relation to the northern part.

The northern sector extends from Vinto towards the East of Tiquipaya and is characterized by a pronounced deepening of the basement from south to north, representing depths that locally exceed 1,000 m. However, in the southern sector, soft gradients can be observed with depths that do not exceed 150 m (Fig. 24).

4.4.2 Quaternary filling of the basin

The Pliocene- Quaternary filling of the work- area is subdivided into three sectors; the southern sector, the central and northern sector, and the southwestern zone of the basin (Fig. 24, see also ch. 4).

Sector 1: The southern part of the valley. South and West of the airport, measured resistivities are very

muy bajas. Esta disminución concierne todas las unidades geoelectricas. Sin embargo, los contrastes de resistividad (contraste conductores/resistentes) entre los diferentes terrenos son conservados. Son características de depósitos muy finos a la imagen de los limos arenosos o arcillosos visibles en superficie y de origen aluvial y de inundación.

El techo de los depósitos lacustres dibuja una meseta (Meseta de la Mayca) cuya altura está comprendida entre 2.450 y 2.500 m (Fig. 24). La meseta con pendiente suave, está cubierta por depósitos plio-cuaternarios de espesores menores a los a 100 m. La zona no presenta ningún interés hidrogeológico para la perforación de pozos profundos.

low. This decrease appears in all the geoelectric units. However, the resistivity- contrasts (contrast conductive/resistant) between the different areas are preserved. There are characteristics of very fine deposits and, sandy or clayey muds visible on the surface which have alluvial and flood origin.

The surface of the lake deposits marks a plateau ("Meseta de la Mayca") whose altitude is between 2,450 and 2,500 m (Fig. 24). The softly pending plateau is covered by Pliocene- Quaternary deposits with thicknesses of less than 100 m. The area does not present any hydrogeological interest for the perforation of deep wells.

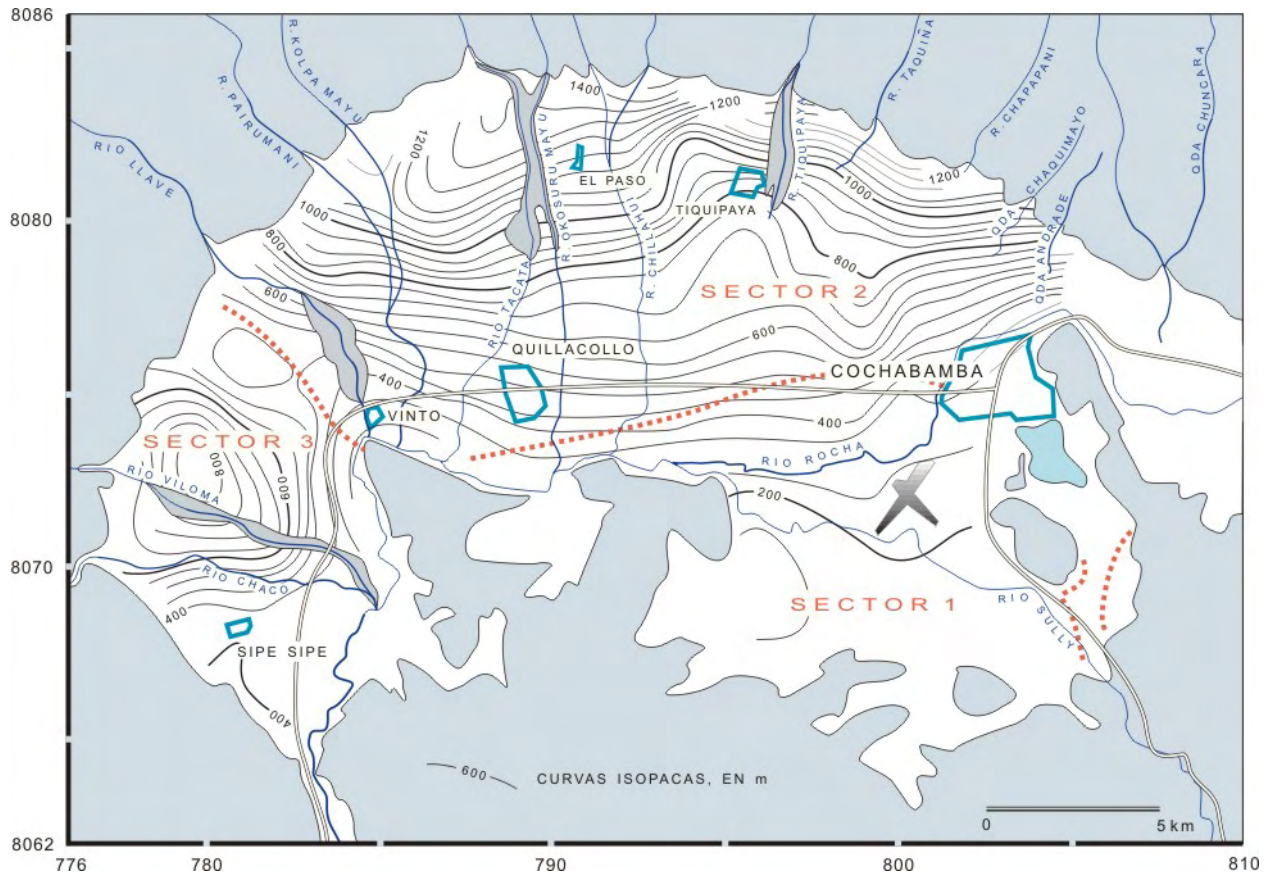


Fig. 24: Zonificación de la cuenca en base al espesor de los depósitos plio-cuaternarios (SEURECA-BRGM-SOGREAH-CGL, 1994) / Zoning of the basin according to the thickness of the Pliocene- Quaternary deposits (SEURECA-BRGM-SOGREAH-CGL, 1994)

Sector 2: La parte central y septentrional de la cuenca. La topografía del techo del terreno está caracterizada por una profundización entre la meseta lacustre al este y una cresta topográfica al oeste ligada al ascenso del techo de los depósitos lacustres. El espesor de los depósitos varía progresivamente a lo largo de un eje de dirección norte-sur. Es máximo al norte. Esta zona conforma todo un sistema de conos aluviales con características favorables a la explotación de aguas subterráneas, un resultado ya discutido y visualizado en la Fig. 22.

Sector 3: La zona suroeste de la cuenca. Se extiende al oeste del valle, entre Vinto y Sipe Sipe. Está limitada al este por una arista noroeste-sureste, cuya altitud es de 2.400 m y que se sobrepone a una estructura de cuarcitas del sistema ordovícico que aflora al sur de Vinto (Fig. 24). En su centro se encuentra un surco de espesores de aluviones hasta 800 m que correspondería al eje de aportación del Río Llave y Viloma.

4.4.3 Análisis

Sin duda hay que considerar importantes los resultados de la investigación de SEURECA-BRGM-SOGREAH-CGL (1994), especialmente la diferenciación de la profundidad del basamento

Sin embargo, en todos los sondeos interpretados, los datos de campo muestran una irregularidad considerable que probablemente se debe a perturbaciones electromagnéticas tales como líneas eléctricas, telefónicas, vías férreas, canalizaciones, antenas de emisión de radios, rejas metálicas, alambrados, etc. Por esta variación de los puntos de medición, las curvas en muchos casos no han podido ser adaptadas a los valores de campo, por lo cual la fiabilidad de los datos no siempre resulta completa.

Sector 2: The central and northern part of the basin. The topography of the top of the ground is characterized by a depression between the lake plateau in the east and a topographical crest in the west linked to the rise of the surface of the lake deposits. The thickness of the deposits varies progressively throughout an axis of north-south direction. It has its maximum in the north. This area comprises a whole system of debris cones with favorable characteristics for the exploitation of groundwaters, a result already visualized in Fig. 22.

Sector 3: The southwestern part of the basin. It extends in the west of the valley, from Vinto to Sipe Sipe. It is limited in the east by a northwest-southeast ridge, whose altitude is of 2,400 m and which covers a structure of Ordovician quartzites cropping out in the south of Vinto (Fig. 24). In its center, a furrow can be located with alluvial thicknesses of up to 800 m that would correspond to the contribution axis of the Llave and Viloma Rivers.

4.4.3 Analysis

The results of the research of SEURECA-BRGM-SOGREAH-CGL (1994) are undoubtedly important, especially the results of the differentiation of the depth of the basement.

However, in all of the interpreted soundings, the field data show a considerable irregularity that probably is owed to electromagnetic disturbances such as powerlines, telephone-lines, railroads, canalizations, radio-broadcasting antennas, metallic fences, etc. Because of this variation of the measurement-points, the curves in many cases have not been able to be adapted to the field-values, therefore the reliability of the data is not always complete.

5 POZOS PROFUNDOS EN EL VALLE CENTRAL

En el informe del Plan Maestro para el Abastecimiento de Agua a la Ciudad de Cochabamba y Diseños Finales de Obras de Rehabilitación y Ampliación (SEURECA-BRGM-SOGREAH-CGL, 1994), se delimitan tres sectores dentro de los sectores 2 y 3 descritos en el capítulo 4.4.2, que se consideran contener un gran espesor de aluviones y una fuerte potencialidad acuífera:

(1) El cono de la Taquiña situado al noreste de Tiquipaya (el cono aluvial del Río Tiquipaya), heterométrico, de pequeñas gravas a bloques de varios metros.

(2) El cono aluvial de gran amplitud, que corresponde a la estructura en profundidad de la cuenca vertiente del Río Jankho Khala/Tacata y Okosuru Mayu, localizada al oeste de El Paso (Fig. 24). Este abanico corresponde a un sistema aluvial evolucionado con material seleccionado.

(3) El relleno de los paleovalles mencionados precedentemente, encontrados en la línea de los ríos Llave y Viloma, entre los pueblos de Vinto y Sipe Sipe, que penetra las formaciones lacustres localmente hasta el zócalo paleozoico (Fig. 24).

El espesor de estos diferentes cuerpos sedimentarios supera los 300 m. Los valores máximos alcanzan 450 m para el cono de la Taquiña, 660 m para el cono de los ríos Tacata y Okosuru Mayu y 580 m para el relleno del paleovalle del Río Llave.

En base a los resultados descritos en el anterior capítulo, SEURECA-BRGM-SOGREAH-CGL (1994) propuso seis posibles lugares para la implantación de pozos profundos, comprendidos en las zonas mencionadas. Los criterios de selección han sido el espesor y la extensión de las formaciones aluviales, la calidad del reservorio ligada a la presencia o ausencia de arcillas y a la granulometría de los depósitos y la proximidad de la zona de recarga.

5 DEEP WELLS IN THE CENTRAL VALLEY

In the report of the Master Plan for the Water- Supply for the City of Cochabamba and the Final Designs of Rehabilitation and Extension Activities (SEURECA-BRGM-SOGREAH-CGL, 1994), three sectors are delimited in the described sectors 2 and 3 referred to in chapter 4.4.2. These sectors are considered to have a big thickness of alluvions and having a high aquiferous potential:

(1) The Taquiña cone located in the northeast of Tiquipaya (the debris cone of the Tiquipaya- River), is heterometric, and made up of small gravels to blocks of several meters.

(2) The debris cone of large extension, that corresponds to the structure in depth of the basin at the slope of the Jankho Khala/Tacata and the Okosuru Mayu Rivers, located in the west of El Paso (Fig. 24). This fan corresponds to an alluvial system that evolved with selected material.

(3) The filling of the paleovalleys mentioned previously, found in the line of the Llave and Viloma rivers, between the villages of Vinto and Sipe Sipe, which penetrates the lacustrine formations locally even down to the Paleozoic basement (Fig. 24).

The thickness of these different sedimentary bodies surpasses 300 m. The maximum values reach 450 m for the Taquiña cone, 660 m for the cone of the Tacata and Okosuru Mayu rivers and 580 m for the filling of the paleovalley of the Llave river.

Based on the results described in the previous chapter, SEURECA-BRGM-SOGREAH-CGL (1994) suggested six possible places for the drilling of deep wells, located in the areas mentioned. The criteria of selection has been: the thickness and the extension of the alluvial formations; the quality of the reservoir associated to the presence or absence of clays as well as to the granulometry of the deposits; and the proximity of the recharge area.

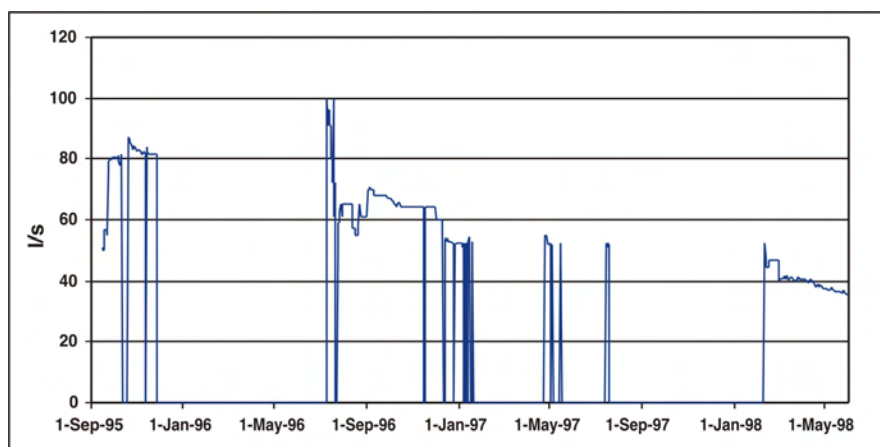


Fig. 25: Caudales de producción (en l/s) en el pozo El Paso 1 (SEMAPA, datos no publicados) / Flows of production (in l/s in the well El Paso 1 (SEMAPA, unpublished data)

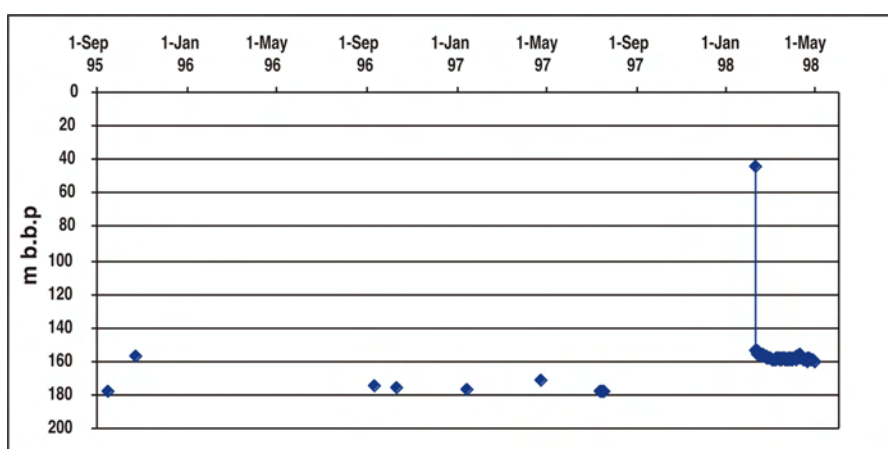


Fig. 26: Niveles dinámicos (en mbbp) en el pozo de explotación El Paso 1 (SEMAPA, datos no publicados) / Dynamic levels (in mbbp) in the producing well El Paso 1 (SEMAPA, unpublished data)

5.1 Pozo profundo "Noroeste El Paso 1"

El sitio elegido para la perforación del primer pozo está localizado a 1 km al sureste del pueblo El Paso. Las obras y la prueba de bombeo se realizaron en la primera mitad del año 1995.

La profundidad final alcanzada por el pozo de reconocimiento fue de 552 m. Se determinó que la zona de transición entre el conjunto aluvial y la unidad fluvio-lacustre subyacente correspondía a la profundidad de los 399 m (Fig. 10). Sobre la base de los datos de la columna litológica, registros eléctricos y los conocimientos sobre el sistema acuífero del valle de Cochabamba del estudio del consorcio SEURECA-BRGM-SOGREAH-CGL, se seleccionaron los niveles acuíferos que debían ser captados, ubicados entre los

5.1 Deep drilling "Noroeste El Paso 1"

The place chosen for the perforation of the first well is located 1 km southeast of the village of El Paso. The works and the pumping test were carried out in the first half of 1995.

The final depth reached by the recognition drilling was 552 m. It was determined that the transition zone between the alluvial set and the underlying fluvio-lacustrine unit corresponded to the depth of 399 m (Fig. 10). Based on the data of the lithological column, the resistivity log and the knowledge about the aquifer system, the appropriate aquifer levels to be captured were selected. Filters were placed between 186 m and the 399 m of depth. This depth was also chosen due to the high contents of iron and manganese in the water

186 m y los 399 m de profundidad. Esta profundidad también fue determinada por los tenores elevados en hierro y manganeso de las aguas extraídas de los horizontes inferiores y, por otra parte, por las incertidumbres relativas a la recarga eficiente de las capas más profundas (véase cap. 7.4).

samples taken from the lower horizons and the uncertainties related to efficient recharge of the deepest strata (see ch. 7.4).

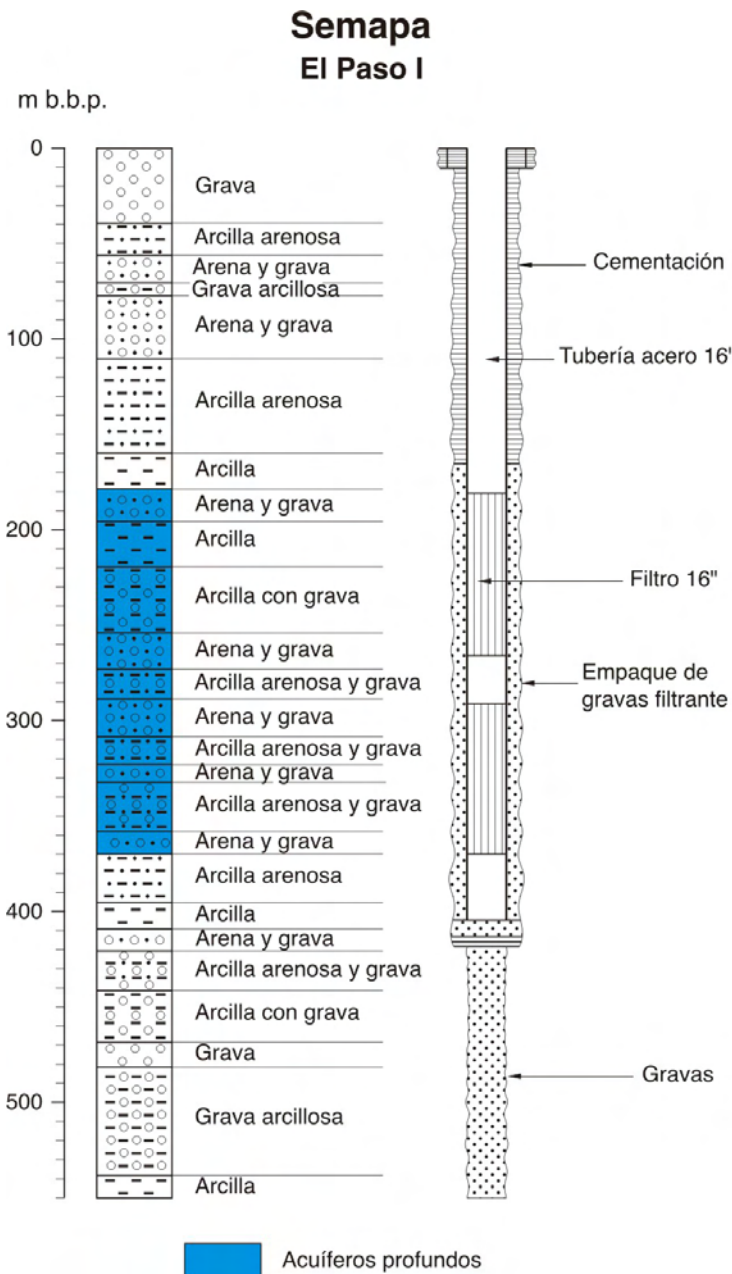


Fig. 27: Perfil litológico y perfil de pozo de la perforación El Paso 1 / Lithological profile and profile of drilling (drilling log ?) of the perforation El Paso 1

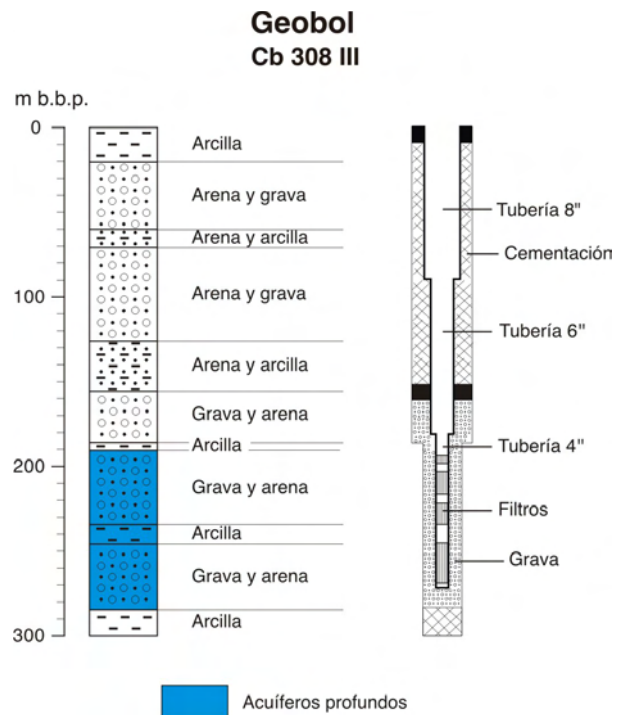
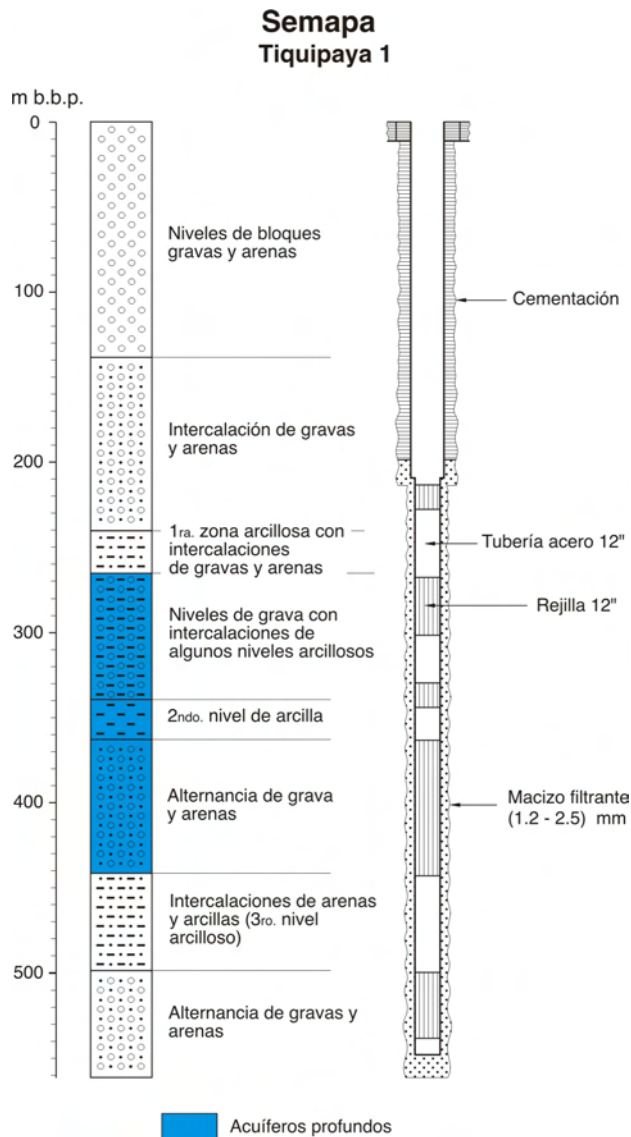


Fig. 29: Perfil litológico y perfil de pozo de la perforación Cb-308 III, Paucarpata / Lithological profile and drilling profile of the perforation Cb-308 III, Paucarpata

Fig. 28: Perfil litológico y perfil de pozo de la perforación Tiquipaya 1 / Lithological profile and profile of drilling (drilling- log ?) of the perforation "Tiquipaya 1

El informe de finalización de obras se destaca un aumento global de la arcillosidad de las formaciones a partir de 360 m de profundidad hasta la profundidad final de pozo (552 m). Además constata la decadencia de la calidad de agua por concentraciones elevadas de materia orgánica. La misma materia orgánica, ocasionando un ambiente reductor, produce las altas concentraciones de hierro y manganeso tanto como la creciente alcalinidad del agua hacia la profundidad.

Posterior a la perforación y en el transcurso de las pruebas de bombeo se notó la presencia de partículas finas y de limolitas en las aguas bombeadas. La interpretación de las pruebas de bombeo por escalones de caudales crecientes y de larga duración revela la existencia de pérdidas de carga muy elevadas que, teni-

The final drilling report points out an overall increase of the mud content of the formations from 360 m deep down to the final depth of the well (552 m). It also confirms the decay of the water quality because of high concentrations of organic matter. The same organic matter causes a reductive environment and, produces the high concentrations of iron and manganese as well as an increase of alkalinity of the water towards depth.

After the perforation and during the pumping tests, the presence of fine muddy particles in the pumped waters became apparent. The analysis of the pumping tests revealed very high losses of the well's load. These losses are due to a plugging of the well (packing of gravels and filters). Insufficient development of the

endo en cuenta la observación anterior, se explican por un taponaje del pozo (empaquete de gravas y filtros) ocasionado por un desarrollo del pozo insuficiente.

El nivel estático de agua, antes del inicio de las pruebas de bombeo en el pozo profundo de El Paso 1, se ubicaba a aprox. 39 m bajo superficie. Los resultados de las pruebas de bombeo arrojaron valores de transmisividad en el orden de $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ y para el coeficiente de almacenamiento aproximadamente $5 \cdot 10^{-4}$.

Por los resultados obtenidos en los ensayos hidráulicos ANTEA recomendó un caudal de producción de 85 l/s, estimando un abatimiento del orden de 130 m.

A pesar de los resultados aparentemente favorables que inicialmente tuvo el pozo profundo Noroeste El Paso 1, con el transcurso del tiempo, su caudal empezó a disminuir y por último estuvo sin funcionar por mucho tiempo, debido a un problema de la bomba (Fig. 25). Posteriormente se realizó un nuevo desarrollo del pozo y se ha iniciado su producción con un caudal de 41 l/s el cual ha vuelto a disminuir hasta mayo del 1998. En la Fig. 25 y Fig. 26 se aprecian los caudales de producción y los respectivos niveles dinámicos en el pozo. Se distinguen las largas interrupciones de funcionamiento tanto como el abatimiento que alcanza 180 m.

5.2 Pozo profundo "Tiquipaya 1"

Del informe de la empresa supervisora de los trabajos de perforación del pozo Tiquipaya 1 (BRGM, 1996), se se deduce la existencia de dos grandes conjuntos de estratos de características favorables para la explotación (Fig. 28):

El primero, hasta una profundidad próxima de los 200 m, constituido esencialmente de elementos gruesos, gravas y arenas.

El segundo, hasta la profundidad de 503 m, se caracteriza por una sedimentación más fina. Se han encontrado niveles arcillosos bien individualizados y se pueden distinguir las unidades descritas a continuación (Fig. 28):

216–239 m	primera zona arcillosa
239–305 m	niveles de gravas con intercalación de pasajes arcillosos
305–325 m	segunda zona arcillosa
325–395 m	alternancia de niveles de gravas y arenas
395–447 m	gravas y arenas con intercalaciones de

well is ultimately responsible for the losses.

The water level before starting the pumping tests in the deep well of El Paso 1, was around 39 m below the surface. The results of the pumping tests yielded transmissivity values in the order of $2.5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, and for the storage coefficient approximately $5 \cdot 10^{-4}$.

Based on the results obtained by the hydraulic tests, ANTEA recommended a pumping rate of 85 l/sec at an estimated drawdown of around 130 m.

In spite of the apparently favorable results initially obtained by the deep well Northwest El Paso 1, with time its flow started to decrease (Fig. 24). Later a new development of the well was carried out. Afterwards, its production began at 41 l/s and again decreased until May 1998. In Fig 25 and GFig 26, the discharge capacity and the respective dynamic levels in the well are shown. The long interruptions of the operation are apparent as well as its drawdown which reaches 180 m.

5.2 Deep well "Tiquipaya 1"

From the report of the supervising company of the perforation works of the "Tiquipaya 1" well (BRGM, 1996), the existence of two large sets of strata of favorable characteristics for exploitation is deduced (Fig. 28):

The first, reaching depths close to 200 m, consist essentially of coarse fragments, gravels and sands.

The second, reaching the depth of 503 m is characterized by a finer sedimentation. Well defined clayey levels have been found. The following units (Fig. 28) can be identified:

216-239 m	first clayey zone
239-305 m	level of gravels with intercalation of clayey horizons
305-325 m	second clayey zone
325-395 m	alternance of levels of gravels and sands
395-447 m	gravel and sands with intercalation of

niveles arcillosos

447-503 m alternancia de gravas y arenas.

El primer conjunto litológico, siendo un conjunto de capas de interés para la explotación, fue descartado para la producción por presumidos problemas de contaminación ubicados preferiblemente en los niveles de acuíferos superficiales y por otra parte para evitar toda interferencia con pozos de baja profundidad.²

El segundo grupo muestra características sedimentarias que permiten esperar potenciales acuíferos interesantes. Sin embargo, desde el comienzo de los trabajos de desarrollo del pozo parecía que los caudales extraídos eran mínimos, observándose que el agua en un principio contenía mucha bentonita, aclarándose progresivamente y volviéndose a enturbiar cada vez que se empezaba nuevamente el desarrollo mediante la utilización de un pistón conjuntamente con el bombeo por aire comprimido.

Mediante una prueba de bombeo se pudo determinar importantes pérdidas de carga relacionadas a deficiencias en la construcción del pozo. Según el informe de ANTEA (1996), las pérdidas tenían tal magnitud, que una determinación de los parámetros hidráulicos del acuífero no fue posible.

Al término de estos trabajos se instaló una bomba que en principio empezó a producir un caudal discontinuo de agua, que posteriormente se estabilizó en alrededor de 15 l/s produciendo a momentos picos un caudal de 20 l/s, con un abatimiento que se estabilizó entre 179 y 180 m. Sin embargo, durante el bombeo las aguas bombeadas continuaban turbias, lo que demostraba que todavía el pozo no estaba completamente desarrollado.

Hasta el momento, el pozo Tiquipaya 1 no ha podido ser completamente desarrollado por los altos contenidos de arcilla que se presentan en los acuíferos. Su caudal de producción de agua turbia es de unos pocos litros, por lo que se encuentra fuera de servicio.

clayey levels

447-503 m alternance of gravels and sands.

The first lithological set, at first a potentially good source for exploitation, was discarded as a possibility for production because of presumed problems of pollution in the levels of the superficial aquifers and also because of its potential for to interference with wells of low depth.³

The second group shows sedimentary characteristics which indicate interesting aquifers. However, from the beginning of the developing works of the well, the flow rates were very low. The water at first contained much bentonite, then became progressively clear and later turned muddy again every time the well was opened using a piston and pumping via compressed air.

During a pumping test, significant well losses were observed and attributed to deficiencies in the construction of the well. According to the report by ANTEA (1996), the losses were of such magnitude, that a determination of the hydraulic parameters of the aquifer became impossible.

Following these efforts, a pump was installed that first produced a discontinuous flow of water, and later stabilized at about 15 l/sec yielding in peak moments, a flow of 20 l/sec, with a drawdown that stabilized between 179 and 180 m. However, during the pumping the pumped waters continued to be turbid, which proved that the well was not completely developed.

Up to now, the well "Tiquipaya 1" has not been fully developed because of the high clay contents of the aquifers. Since its flow rate was low and its waters were turbid, the well was shut down.

² Vale comentar, que tarde o temprano la interferencia hubiese sido notoria, ya que todas las capas integran un sistema acuífero interconectado. Esto resulta confirmado por Stimson (1991) que en base a perfiles hidroquímicos concluye, que existe interconexión hidráulica entre las capas.

³ It should be pointed out that sooner or later the interference would have become evident, as all strata form one interconnected aquifer system. This has been confirmed by Stimson (1991), who, based on hydrochemical information, concludes that the strata are hydraulically interconnected

5.3 Pozo de investigación Cb- 308 III, Paucarpata

Dentro del marco de investigaciones hidrogeológicas del Proyecto CABAS se programó la perforación de un pozo de exploración en la localidad de Paucarpata, Provincia Quillacollo del Departamento de Cochabamba. Este pozo fue ubicado, en base a los estudios geológicos y geofísicos realizados por el Proyecto CABAS, en las coordenadas UTM 8 079 350 N y 787 550 E y en 2.600 m s.n.m.. La perforación y la prueba de bombeo se realizaron en 1993.

Los objetivos fundamentales de la perforación del pozo de investigación Cb-308 III fueron la investigación de las características hidráulicas e hidroquímicas de los sistemas acuíferos profundos.

La perforación del pozo piloto se realizó con 12^¼ " de diámetro hasta una profundidad de 300 m. El perfilaje de pozo se realizó por cuatro métodos: Resistividad corta de 16", resistividad larga de 64", rayos gamma y potencial espontáneo (Fig. 29).

En base al perfilaje de pozo y la correlación con la columna litológica se identificaron dos sectores con acuíferos claramente definidos. Un primer acuífero hasta los 128 m de profundidad y un acuífero inferior de 193 a 300 m, separados por una capa intermedia con resistividad baja debido a su contenido de sedimentos de granulometría fina. El diseño de pozo determinó la colocación de la tubería de revestimiento hasta los 275 m de profundidad (Huaranca et al., IT CABAS N°28, 1994). Los filtros fueron ubicados en el acuífero inferior a partir de los 200 m (Fig. 29).

Ensayo de bombeo

En el pozo profundo Cb-308 III se realizó un ensayo de bombeo con miras a obtener información sobre los parámetros hidráulicos de los acuíferos profundos y su posible interconexión hidráulica con los acuíferos superiores captados en dos pozos piezométricos Cb-308 I y Cb-308 II, ubicados a 50 y 39,5 m de distancia del pozo bombeado. Sin embargo, durante el ensayo en los dos pozos de observación no se registraron variaciones en sus niveles estáticos. La prueba se ha efectuado con un caudal constante de 18 l/s durante 34,5 h, produciendo un abatimiento de 13 m. Con los datos obtenidos se determinó la transmisividad de $2,5 \cdot 10^{-3}$ m²/s en base al método de JACOB. El caudal específico ha sido 1,4 l/(sm). Por no haber tenido reacción en los pozos de observación, no ha sido posible la determinación de un coeficiente de almacenamiento.

Well of research Cb- 308 III, Paucarpata

Within the hydrogeological research of the CABAS-Project the perforation of an exploration well was programmed close to Paucarpata, Quillacollo Province of the Department of Cochabamba. This well was placed (based on the geological and geophysical studies carried out by the CABAS Project), at the UTM coordinates 8 079 350 N and 787 550 E and 2,600 m above sea level. The perforation and the pumping- test were carried out in 1993.

The basic goals of the perforation of the research-well Cb-308 III were the investigation of the hydraulic and hydrochemical characteristics of the deep aquiferous systems.

The perforation of the pilot well was carried out with 12^¼" of diameter down to a depth of 300 m. The logging of the drillhole was carried out through four methods: Short resistivity of 16", long resistivity of 64", gamma rays and spontaneous potential (Fig. 29).

Based on the logs and the correlation with the lithological column, two sectors with clearly defined aquifers were identified. A first aquifer reaches down to 128 m and a lower aquifer reaches between 193 and 300 m. The aquifers are separated by an intermediate stratum with low resistivity caused by its contents of sediments of fine grains. The design of the well determined the placing of the borehole string down to 275 m depth (Huaranca et al., IT CABAS N°28, 1994). The filters were placed in the inferior aquifer starting at 200 m (Fig. 29).

Pumping test

In the deep well Cb-308 III a pumping test was carried out to obtain information on the hydraulic parameters of the deep aquifers and its possible hydraulic interconnection with the superior aquifers collected in two piezometric wells Cb-308 I and Cb-308 II, and located at a in a distance of 50 and 39,5 m from the operating well. However, during the test in none of the two observation wells, groundwater level variations were observed. The test has been carried out with a constant flow of 18 l/sec during 34.5 h, causing a drawdown of 13 m. Thanks to the data obtained, the transmissivity of $2.5 \cdot 10^{-3}$ m²/s was determined following the JACOB method. The specific flow rate was 1.4 l/(sm). No storage coefficient could be calculated due to the lack of a reaction in the observation wells.

5.4 Análisis

En términos generales, las perforaciones profundas llevadas a cabo en el Valle Central de Cochabamba permiten concluir que las condiciones hidrogeológicas en los niveles profundos del relleno plio-cuaternario, no son favorables para el aprovechamiento de aguas subterráneas.

En primer lugar, la conductividad hidráulica claramente disminuye con la profundidad por el aumento de contenidos de arcilla en los niveles gravosos y arenosos y de capas netamente arcillosas. Por esta razón, el rendimiento de los pozos resulta mas restringido que en los niveles acuíferos superiores.

Por la misma razón, el flujo de agua subterránea que recarga a estos niveles profundos suele ser mas lento y producir acuíferos de aguas antiguas como en el caso del Pozo El Paso I (véase Cap. 7.4). El flujo restringido hacia los niveles profundos llevará tarde o temprano a una disminución del caudal de un pozo de explotación, si el caudal excede al volumen del flujo de recarga. Se puede insinuar que éste proceso, posiblemente entre otros, sea causa de la disminución del caudal de explotación en el Pozo El Paso I.

Otro aspecto que pone en duda la factibilidad de la explotación de acuíferos profundos es la calidad de las aguas. Altos contenidos de hierro y manganeso por las condiciones reductoras en el medio exigen un tratamiento de las aguas o la mezcla con aguas de otras fuentes antes de ser distribuidas para el consumo humano.

Por lo tanto, en síntesis, se considera que la explotación de las aguas en las napas profundas no presenta ventajas que justifiquen la elevada inversión de su alumbramiento.

5.4 Analysis

In general, deep drilling carried out in the Central Valley of Cochabamba allow the conclusion, that the hydrogeological conditions in the deep levels of the Pliocene- Quaternary filling, are not favorable for the exploitation of groundwaters.

In the first place, the hydraulic conductivity clearly decreases with depth and along with the increasing share of clay in the gravelly and sandy levels. For this reason, the yield of the wells is generally lower than in the upper water- bearing levels.

For the same reason, the recharge at these deep levels is usually slower. This leads to aquifers that contain old waters as it is the case of the Well El Paso I (be seen Ch. 7.4). Restricted flow towards deep levels sooner or later leads to a decrease in the pumping rate of an operating well. This, among other reasons might explain the decreasing pumping rate at "El Paso I".

Another aspect that puts in doubt the feasibility of the exploitation of deep aquifers is the quality of the waters. High contents of iron and manganese due to the reductive conditions in the environment require a treatment of the waters or the mixing with waters of other sources before distribution for human consumption.

Therefore, in synthesis, it is considered that the exploitation of the waters in the deep layers does not present advantages that would justify the high investment for their development.

6 HIDROGEOLOGIA / *HYDROGEOLOGY*

La información existente sobre la hidrogeología, incluyendo las características hidrodinámicas y los parámetros hidráulicos, ha sido generada en su mayoría por el Proyecto Integrado de Recursos Hídricos en Cochabamba, PIRHC, el consorcio SEURECA-BRGM-SOGREAH-CGL y el Proyecto CABAS. Además de la sola recopilación de datos, el Consorcio SEURECA-BRGM-SOGREAH-CGL ha utilizado los datos para el cálculo de un modelo numérico de los procesos hidráulicos en el valle. El Proyecto CABAS por su parte ha elaborado un mapa hidrogeológico.

6.1 *Mapeo hidrogeológico*

En base al reconocimiento del cuaternario efectuado por Veit (1992), en el Proyecto CABAS, mediante una tesis de grado ha elaborado un primer mapa hidrogeológico del Valle Central de Cochabamba (Colque, 1998).

En razón de la variada composición de los sedimentos en la cuenca del Valle Central de Cochabamba, formada por rocas consolidadas que rodean el mismo valle, bloques, cantos y gravas que principalmente se presentan hacia el norte y oeste de valle, pasando gradualmente al mayor contenido de arenas y limos para encontrarse con grandes espesores de arcillas que se depositaron en la parte central, el comportamiento hidráulico de los acuíferos varía ampliamente en estrecha relación con la litología. En el área del Valle Central se puede hacer una primera distinción principal:

Rocas consolidadas, pertenecientes al Paleozoico y Mesozoico, cuyas características hidráulicas no favorecen la presencia de acuíferos importantes.

Depósitos no consolidados, desarrollados durante el Cenozoico, que en gran parte presentan condiciones favorables para la existencia de reservorios de aguas subterráneas.

La caracterización hidrogeológica fue elaborada de acuerdo a normas establecidas por la UNESCO (Struckmeier et al., 1995). Estas normas para la elaboración de mapas hidrogeológicos plantean una clasificación de las unidades según sus características como reservorio de aguas:

The existing information on hydrogeology, including the hydrodynamic characteristics and the hydraulic parameters has been generated mainly by the Integrated Project of Hydric Resources in Cochabamba, PIRHC, the SEURECA-BRGM-SOGREAH-CGL consortium and the CABAS Project. Along with the simple compilation of data, the SEURECA-BRGM-SOGREAH-CGL Consortium has used the data for the calculation of a numerical model of the hydraulic processes in the valley. The CABAS Project has elaborated a hydrogeological map.

6.1 *Hydrogeological Mapping*

Following the recognition of the Quaternary carried out by Veit (1992), in the CABAS Project, a first hydrogeological map of the Central Valley of Cochabamba was elaborated through a thesis of degree (Colque, 1998).

Because of the different composition of the sediments in the basin of the Central Valley of Cochabamba, formed by consolidated rocks that surround the valley, blocks, boulders, and gravels that are mainly present towards the North and West of the valley, passing gradually to a major content of sands and muds to be found with great thicknesses of clays, which were deposited in its central part, the hydraulic behavior of the aquifers varies widely in close relationship with the lithology. In the area of the Central Valley a first main distinction can be made:

Consolidated Rocks, that belong to the Paleozoic and Mesozoic, whose hydraulic characteristics do not favor the presence of important aquifers.

Unconsolidated Deposits, developed during the Cenozoic, that in large parts host groundwaters reservoirs.

The hydrogeological characterization was elaborated according to norms established by UNESCO (Struckmeier et al., 1995). To develop hydrogeological maps, these norms ask for a classification of the units according to their characteristics as water reservoirs:

Grupo I: En depósitos porosos no consolidados.

Este grupo representa unidades litológicas de porosidad intergranular, e.d. *acuíferos granulares* compuestos de bloques, gravas, conglomerados, arenas, areniscas e limos.

Grupo II: En rocas fisuradas: Este grupo reúne unidades litológicas consolidadas, permeables por la presencia de fisuras, fracturas o procesos de disolución, e.d. *acuíferos fracturados* que incluyen rocas ígneas, metamórficas o sedimentarias consolidadas y compactas. En la región de estudio, p. ej. en las rocas calcáreas del Cretácico y Pérmico (Mapa 3), el agua puede provocar la disolución de las rocas, dando lugar a acuíferos kársticos, clasificados como *acuíferos cavernosos*.

Grupo III: Solo acuíferos locales (en rocas porosas o fisuradas), o regiones sin agua subterránea en cantidades apreciables: Formaciones clasificadas en este grupo no tienen importancia para el aprovechamiento de sus aguas subterráneas. Son unidades litológicas de baja permeabilidad o *acuicludos* formados por arcillas, arcilitas, lutitas y filitas.

A continuación se describen las características hidrogeológicas más sobresalientes de algunas formaciones geológicas del área de estudio. Las nomenclaturas de las formaciones corresponden a la leyenda del mapa hidrogeológico (Mapa 3).

6.1.1 Grupo I: Acuíferos en depósitos porosos no consolidados

Depósitos no consolidados pueden constituir una importante fuente de agua subterránea según su extensión o interconexión hidráulica con otros cuerpos de agua. Por ello, muchos de éstos depósitos se encuentran clasificados en las subdivisiones Ia y Ib (de color azul oscuro y azul claro en el Mapa 3). Sin embargo, existen depósitos no consolidados clasificados como IIIa de color café claro si constituyen una fuente de agua subterránea muy reducida, como p. ej. los depósitos glaciales (grupo IIIa).

Dentro del grupo I se distinguen los subgrupos Ia y Ib:

Ia: Acuíferos extensos y productivos; color azul oscuro

Abanicos aluviales (Q): En el área estudiada el sector con mayor importancia para el aprovechamiento de las aguas subterráneas corresponde a los abanicos aluvia-

Group I: In unconsolidated porous deposits. This group represents lithological units of intergranular porosity, i.e. granular aquifers composed by blocks, gravels, conglomerates, sands, sandstone and muds.

Group II: In fissured rocks: This group brings together consolidated lithological units, permeable due to fissures, fractures or processes of dissolution, i.e. fractured aquifers that include igneous, metamorphic or sedimentary rocks. In the studied region, e.g. in the calcareous rocks of the Cretaceous and Permian (Map 3), the water can lead to the dissolution of the rocks, giving rise to karstic aquifers, classified as cavernous aquifers.

Group III: Only local aquifers (in porous or fissured rocks), or regions without subsurface water in noticeable quantities: Formations classified in this group do not have importance for the exploitation of their groundwaters. They are lithological units of low permeability or aquicludes formed by clays, shales, mudstones and phyllites.

Next are described, the most important hydrogeological characteristics of some geological formations of the studied area. The nomenclatures of the formations correspond to the legend of the hydrogeological map (Map 3).

6.1.1 Group I: Aquifers in unconsolidated porous deposits

Unconsolidated deposits can be an important source of groundwater depending on their extension or hydraulic interconnection with other bodies of water. That is why a large number of these deposits are classified in the subdivisions Ia and Ib (of dark blue and light blue color in Map 3). However, there exist unconsolidated deposits classified as IIIa of light brown color if they have only little areal extension or low hydraulic conductivities, as e.g. the glacial deposits (group IIIa).

In group I the subgroups Ia and Ib can be identified:

Ia: Large and productive aquifers; dark blue color

Alluvial cones (Q): In the studied area the sector with major importance for the exploitation of groundwaters corresponds to the alluvial cones developed in the

les desarrollados en la parte suroeste y norte del Valle Central. La calidades hidroquímicas de las aguas, su fácil percolación y rápida recarga por los ríos que descienden de la cordillera, tanto como la gran conductividad hidráulica del acuífero atribuyen a esta unidad la mayor importancia para el aprovechamiento de aguas subterráneas en el Valle Central.

Terrazas de los ríos de pendientes bajas (Q): Esta categoría comprende el Río Rocha (que atraviesa la ciudad de Cochabamba), los Ríos Tintaya, Calliri y Tapacarí (ubicados en el extremo suroeste del mapa hidrogeológico), el Río Viloma y Tacata, también son parte del grupo hidrogeológico Ia por disponer de una extensión y permeabilidad considerable (Mapa 3).

Ib: Acuíferos locales o discontinuos de producción moderada; color azul claro.

Depósitos fluvio-lacustres (Q): Corresponden a este tipo de unidad los abanicos aluviales que se encuentran en la zona central y sur del valle. La secuencia que constituye esta unidad está caracterizada por una compleja alternancia de materiales de textura gruesa (grava y arena) interdigitada con materiales de textura fina (arcillas y limos). Esta particularidad proporciona a esta unidad acuíferos multicapa, semiconfinados y sin continuidad lateral. Son identificados en el mapa hidrogeológico con color azul claro (Mapa 3).

Hacia el sud aumentan limos y arcillas de origen lacustre. En algunos casos aún existen remanentes de lagunas (Laguna Alalay). Por su baja permeabilidad, estos depósitos localmente son de baja productividad. Esta unidad hidrogeológica también se desarrolla ampliamente en el sud del valle de Sacaba, siendo predominante material arcilloso a partir de los 60 m por debajo de la superficie, hecho por el cual la mayoría de los pozos perforados en el área de Sacaba no sobrepasan dicha profundidad.

Terrazas aluviales de ríos de pendientes altas (Q): Comprenden sedimentos de textura gruesa como cantos, grava y arena, reflejan la actividad fluvial. Esta composición litológica hace que los depósitos cuenten con valores de permeabilidad y transmisividad altos ($1,5 \cdot 10^{-4}$ a $6 \cdot 10^{-4}$ m/s y $3,5 \cdot 10^{-3}$ a $1,2 \cdot 10^{-2}$ m²/s, respectivamente). Esta unidad tiene un comportamiento de acuífero libre, donde la superficie freática constituye el límite superior de saturación. Sin embargo, su restringida extensión los ubica en el grupo Ib.

southwestern and northern part of the Central Valley. The hydrochemical qualities of the waters, their easy percolation and fast recharge by the rivers that come down from the Cordillera, as much as the great hydraulic conductivity of the aquifer give this unit the biggest importance for the exploitation of groundwaters in the Central Valley.

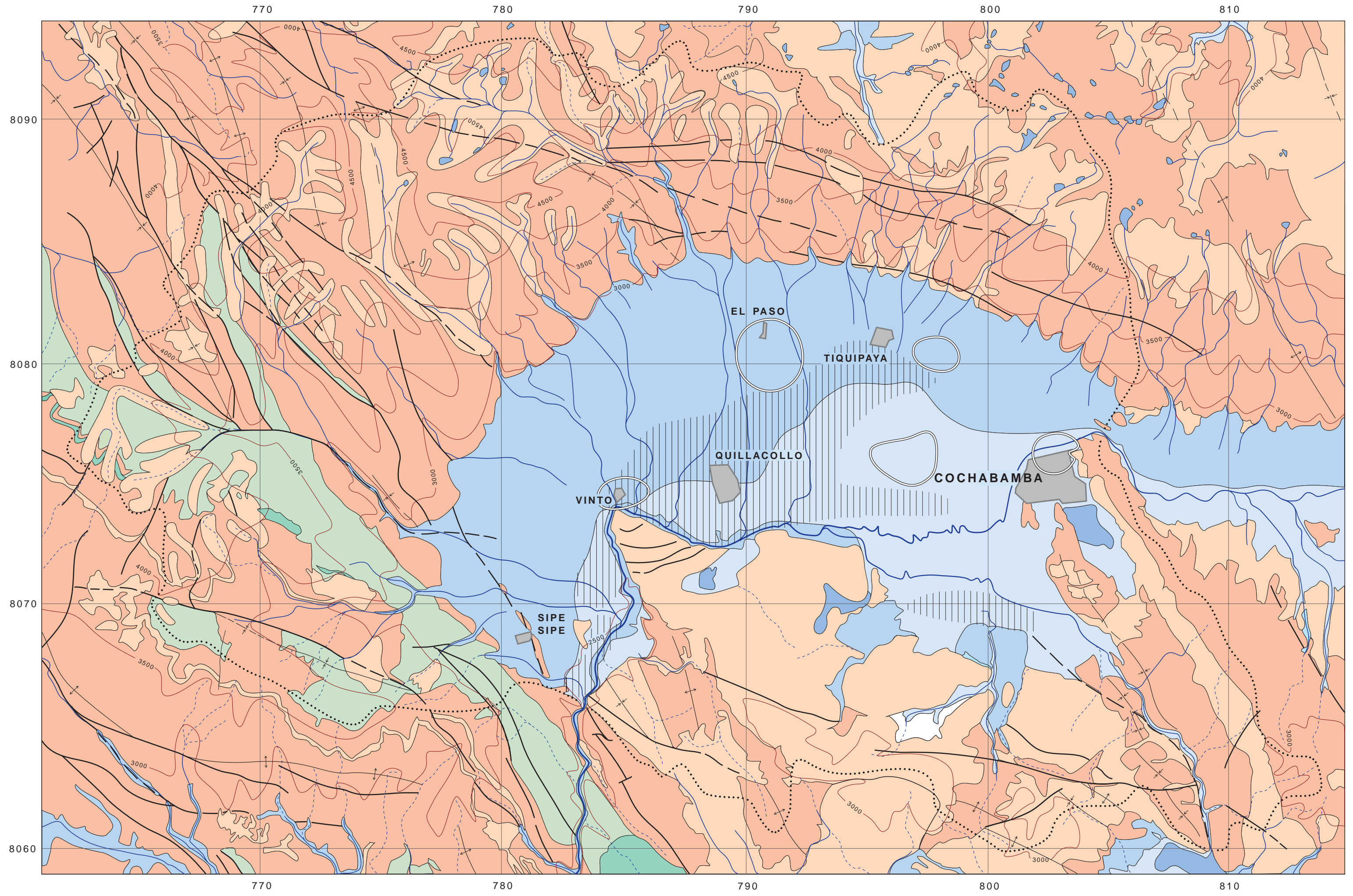
Terraces of the rivers with low gradient (Q): This category includes the Rocha River (that crosses the city of Cochabamba), the Tintaya, Calliri and Tapacarí rivers (placed in the southwestern end of the hydrogeological map). The Viloma and Tacata rivers are also part of the hydrogeological group Ia, because they have a considerable extension and permeability (Map 3).

Ib: Local or discontinuous aquifers of moderate production; light blue color.

Fluvio-lacustrine deposits (Q): The alluvial cones located in the central southern area of the valley correspond to this type of unit. The sequence that constitutes this unit is characterized by a complex alternance of materials of coarse texture (gravel and sand) interfingered with materials of fine texture (clays and muds). This characteristics lead to semiconfined, multilayer aquifers without lateral continuity. They are identified in the hydrogeological map with light blue color (Map 3).

Towards the south the mud-clayey lacustrine deposits increase. In some cases, remnants of lagoons ("Laguna Alalay") still exist. Locally, for its low permeability, these deposits are of low productivity. This hydrogeological unit is also widely developed in the South of the Sacaba Valley, being predominantly of clayey material starting at 60 m below the surface; fact for which most of the perforated wells in the area of Sacaba do not surpass this depth.

Alluvial terraces of rivers with high gradient (Q): They include sediments with coarse texture as clasts, gravel and sand reflecting the fluvial activity. This lithological composition makes the deposits to have high values of permeability and transmissivity ($1,5 \cdot 10^{-4}$ to $6 \cdot 10^{-4}$ m/sec and $3,5 \cdot 10^{-3}$ to $1,2 \cdot 10^{-2}$ m²/s, respectively). This unit present unconfined aquifers, where the phreatic surface constitutes the upper limit of saturation. However, its restricted extension places them in the group Ib.



MAPA HIDROGEOLOGICO VALLE CENTRAL DE COCHABAMBA

GRUPO I EN ROCAS POROSAS NO CONSOLIDADAS

I a ACUÍFEROS EXTENSOS Y PRODUCTIVOS
 ABANICOS ALUVIALES Y TERRAZAS EN RIOS DE PENDIENTES BAJAS (CUATERNARIO):
 BLOQUES, CANTOS, GRAVAS, ARENAS Y LIMOS

I b ACUÍFEROS LOCALES O DISCONTINUOS DE PRODUCCIÓN MODERADA
 DEPÓSITOS FLUVIO-LACUSTRES (CUATERNARIO): GRAVAS, ARENAS, LIMOS Y ARCILLAS
 TERRAZAS ALUVIALES DE RÍOS DE PENDIENTES ALTAS (CUATERNARIO):
 ARCILLAS, LIMOS, ARENAS Y GRAVAS

GRUPO II EN ROCAS FRACTURADAS

II a ACUÍFEROS RELATIVAMENTE EXTENSOS Y PRODUCTIVOS, SOLO EN PROFUNDIDAD
 FORMACIÓN EL MOLINO (CRETÁCICO):
 CALIZAS DE ALTA PUREZA FRACTURADAS Y KARSTIFICADAS

II b ACUÍFEROS LOCALES DE PRODUCTIVIDAD MODERADA, FRECUENTEMENTE SOLO EN PROFUNDIDAD
 FORMACIÓN EL MOLINO (CRETÁCICO):
 CALIZAS, ARENISCAS CALCÁREAS Y MARGAS FRACTURADAS PERO NO KARSTIFICADAS

GRUPO III ACUÍFEROS LOCALES (EN ROCAS POROSAS O FRACTURADAS) O REGIONES SIN AGUAS SUBTERRÁNEAS EN CANTIDADES ADECUADAS

III a ACUÍFEROS LOCALES, PARTICULARMENTE EN ZONAS FRACTURADAS; NO SON EXCLUIDOS ACUÍFEROS MAS PRODUCTIVOS EN PROFUNDIDAD
 FORMACIÓN SAN BENITO (ORDOVÍCIO): CUARCITAS ARENISCAS Y LIMOLITAS FRACTURADAS
 FORMACIÓN CATAVI (SILÚRICO) Y FORMACIÓN SANTA ROSA (DEVÓNICO):
 LUTITAS Y ARENISCAS FRACTURADAS
 DEPÓSITOS MORRÉNICOS (HOLOCENO INFERIOR): BLOQUES, GRAVAS Y ARCILLAS
 DEPÓSITOS DE DERRUMBE Y DEPÓSITOS COLUVIO-ALUVIALES (CUATERNARIO):
 BLOQUES ANGULOSOS EN MATRIX LIMO-ARCILLOSA

III b REGIONES SIN AGUA SUBTERRÁNEA EN CANTIDAD ADECUADA, TAMPOCO EN PROFUNDIDAD
 FORMACIÓN ANSALDO (ORDOVÍCIO): LIMOLITAS Y ARENISCAS
 FORMACIÓN UNCIÁ (SILÚRICO), FORMACIÓN ICLA (DEVÓNICO):
 LUTITAS Y LIMOLITAS EN PARTE ARENOSAS
 FORMACIÓN TORO TORO (CRETÁCICO):
 CANTOS EN MATRIX ARCILLOSA, LIMOLITAS, EN PARTE ARENOSAS
 FORMACIÓN SANTA LUCÍA (TERCIARIO):
 ARCILLAS, MARGAS, LIMOLITAS, EN PARTE ARENOSAS
 FORMACIÓN MOROCHATA (TERCIARIO): CONGLOMERADO POLIMÍCTICO DE
 MÁTRIX ARENO-ARCILLOSA, INTERCALADO CON TOBAS
 FORMACIÓN SACABA (TERCIARIO): ARENAS Y ARCILLAS

LEGENDA:

- RIO PERMANENTE
- RIO INTERMITENTE
- LAGO, LAGUNA
- CURVA DE NIVEL (INTERVALOS DE 500m)
- FALLA
- FALLA INFERIDA
- EJES ANTICLINALES
- EJES SINCLINALES
- LÍNEA DE DIVISIÓN DE AGUAS SUPERFICIALES
- LÍMITE DE ÁREA CON INTENSA EXPLOTACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS
- LÍMITE DE ÁREA CON FLUJO ARTESIANO

ESCALA: APROX. 1 : 145 000

6.1.2 Grupo II: Acuíferos en rocas fracturadas

Parte del área de estudio está constituida por depósitos consolidados. Estos depósitos suelen tener importancia para el aprovechamiento del recurso hídrico únicamente por la presencia de fracturamiento. Esto es el caso de la formación El Molino (K), la formación San Benito (O) y la formación Santa Rosa (D) a pesar de la reducida extensión areal de esta última. Mientras las formaciones San Benito y Santa Rosa son ubicadas en el grupo IIIa, la formación El Molino resulta tener levemente mejores potenciales para el aprovechamiento de los recursos de aguas subterráneas por estar karstificado y constituye el grupo IIa y IIb.

IIa: Acuíferos relativamente extensos y productivos, solo en profundidad; color verde oscuro

Formación El Molino (K): La formación se desarrolla a lo largo de una faja de dirección general noroeste-sureste y se constituye de calizas de variable pureza. En la parte sur de la formación (Mapa 3), se ubican calizas de alta pureza en las cuales el proceso de karstificación ha llegado a mayor madurez. Presenta fallas regionales de dirección noroeste-sureste y fracturas propicias para la infiltración de agua de precipitación y la acción de procesos de karstificación. Estas partes son asignadas al grupo IIa.

Formación Copacabana (P): Calizas de pureza relativamente alta, karstificadas y ubicadas en la parte oeste del mapa, como franja de poco espesor que bordea el flanco sur de la formación El Molino

IIb: Acuíferos relativamente extensos y productivos, solo en profundidad; color verde claro

Formación El Molino (K): La mayor parte de la formación presente en el mapa se compone de areniscas calcáreas y margas y no constituye una formación de gran importancia para el aprovechamiento del recurso de agua y por lo tanto cae en el grupo IIb.

6.1.3 Grupo III: Acuíferos locales (en rocas porosas o fracturadas) o regiones sin aguas subterráneas en cantidades apreciables

IIIa: Acuíferos locales, particularmente en zonas fracturadas; no son excluidos acuíferos en profundidad; color café claro

Formación San Benito (O): Esta formación está compuesta por cuarcitas, areniscas y limolitas con una

6.1.2 Group II: Aquifers in fractured rocks

Part of the study area consists of consolidated deposits. These deposits usually have importance for the exploitation of the hydric resource only due to the presence of fracturing. This is the case of the El Molino- Formation (K) and the Copacabana – Formation (P) in spite of the reduced areal extension of the latter. While the San Benito and Santa Rosa- Formations are placed in the group IIIa, the El Molino- Formation has slightly better potential resources for the exploitation of groundwaters for being karstified and is therefore placed into group IIa and IIb.

IIa: Relatively large and productive aquifers, only in depth; dark green color.

El Molino- Formation (K): This formation crops out along a generally northwest-southeast striking belt and consists of limestones of variable pureness (Map 3). Carbonate rocks of high purity in which the process of karstification has reached higher maturity are located in the southern part of the area. Here, regional faults of northwest-southeast direction produce favorable conditions for rain-water infiltration and subsequent karstification. These parts are assigned to group IIa.

Copacabana- Formation (P): Limestones of relatively high pureness, karstified and located in the western part of the map. They form a strip of little thickness that borders the southern flank of the El Molino- Formation.

IIb: Relatively large and productive aquifers, only in depth; light green color.

El Molino- Formation (K): Most of the formation presented in the map is composed by calcareous sandstone and marls and does not constitute a formation of great importance for the exploitation of the water resource. Therefore is placed into the group IIb.

6.1.3 Group III: Local aquifers (in porous or fractured rocks) or regions without groundwaters in noticeable quantities

IIIa: Local aquifers, particularly in fractured areas; aquifers in depth are not excluded; light brown color.

San Benito- Formation (O): This formation is composed of quartzite, sandstone and siltstones with a sec-

permeabilidad secundaria debida a la fracturación por procesos tectónicos . Ocupa gran parte del centro-sur del mapa (Mapa 3).

Formación Catavi (S) y Santa Rosa (D): Por sus características litológicas, estas rocas son de permeabilidad muy baja y con escasas posibilidades para el aprovechamiento de aguas subterráneas (PIRHC, 1976). Similar a la formación San Benito, la formación Santa Rosa (D), integra el grupo IIIa de color café claro con la diferencia que sus afloramientos son reducidos y están formados por areniscas con niveles de lutitas.

Depósitos morrénicos (Q): A ésta unidad corresponden los depósitos de glaciación caracterizados por bloques y gravas en matrix arcillosa. Estos depósitos se encuentran por encima de los 4.000 m s.n.m. (Cordillera del Tunari) y son producto de la glaciación del Holoceno Inferior en un clima de bajas temperaturas y precipitaciones relativamente altas (Veit, 1992). En el mapa de las formaciones cuaternarias son identificadas como unidades 1 y 2 (Mapa 2).

Depósitos de derrumbe (Q): Asimismo existen afloramientos puntuales de depósitos de derrumbe en los que la ocurrencia de agua es de baja a nula. Estos depósitos se producen a consecuencia de la elevada pendiente, fuertes lluvias y actividad tectónica que provocan la inestabilidad y el derrumbe de los materiales ubicados en las faldas de serranías.

Depósitos coluvio-aluviales (Q): Esta unidad se desarrolla principalmente en el flanco sud de la Cordillera del Tunari (paralela a la falla Tunari), y en otros cerros de menor altura (véase Mapa 2). El material se caracteriza por presentar bloques angulosos de diferente tamaño en una matrix limo-arenosa (Veit, 1992). En general, este material carece de importancia para la explotación de aguas subterráneas, pero puede producir vertientes locales.

IIIb: Acuíferos locales, particularmente en zonas fracturadas; no son excluidos acuíferos en profundidad; color café oscuro

Formación Ansaldo (O): Ocupa gran parte del mapa (Mapa 3). Se compone de limolitas y niveles de areniscas y no presenta condiciones favorables a la extracción de aguas subterráneas.

Formación Uncía (S) y Formación Icla (D): Afloran en un cordón orientado NO-SE. Consiste de lutitas y limolitas, en parte arenosas con escasas intercalaciones de areniscas. Presenta pocas posibilidades para la ex-

ondary permeability due to the fracturing by tectonic processes. It occupies most of the center-south of the map (Map 3).

Catavi- (S) and Santa Rosa- (D) Formations: Due to their lithological characteristics, these rocks are of very low permeability and with scarce possibilities for the exploitation of groundwaters (PIRHC, 1976). Similar to the San Benito- formation, the Santa Rosa formation (D), integrates the group IIIa of light brown color with the difference that their outcrops are reduced and are composed of sandstone with levels of mudstones.

Moraine deposits (Q): To this unit correspond the deposits of glaciación characterized by blocks and gravels in a clayey matrix. These deposits are found above an altitude of 4,000 m (Range of the Tunari Cordillera) and are the product of the glaciación of the Lower Holocene in a climate of low temperatures and relatively high rainfalls (Veit, 1992). In the map of the quaternary formations, they are identified as units 1 and 2 (Map 2).

Landslide Deposits (Q): Likewise there are spots of outcrops of landslide deposits in which the occurrence of water is low to null. These deposits are produced as a result of the high slopes, heavy rains and tectonic activity that lead to the instability and the collapse of the materials placed in the skirts of mountainous areas.

Colluvio- alluvial deposits (Q): This unit has developed mainly on the southern flank of the Range of the Tunari Cordillera (parallel to the Tunari fault), and in other mountains of minor altitude (see Map 2). The material is characterized by the presence of angular blocks of different size in a mud-sandy ground mass (Veit, 1992). In general, this material lacks importance for the exploitation of groundwaters, but it may produce local springs.

IIIb: Local aquifers, particularly in fractured areas; aquifers in depth are not excluded; dark brown color.

Ansaldo- Formation (O): It occupies most area of the map (Map 3). It is composed by mudstones and levels of sandstone and it does not present favorable conditions for the extraction of groundwaters.

Uncía- (S) and Icla-Formation (D): The formations crop out as a NW-SE oriented belt. They are composed of mudstones and shales, slightly sandy, with some intercalations of sandstone.

tracción de aguas subterráneas.

Formación Toro Toro (K): Aflora escasamente en el SO de la hoja y consiste de conglomerado en matrix arcillosa, areniscas limosas y limolitas.

Formación Santa Lucía (T): Aflora infrayacente a la formación Morochata. Consiste de arcillas y margas, intercaladas con areniscas calcáreas y limolitas. La parte superior de esta formación contiene arcillas y margas.

Formación Morochata (T): Aflora en una franja NO-SE en la parte occidental del mapa a lo largo del sistema de fallas Sipe-Sipe. Consiste de un conglomerado polimíctico con máxix areno-arcillosa, areniscas arcillosas y tobas, que no proporcionan condiciones para el aprovechamiento de aguas subterráneas.

Formación Sacaba (T): Afloramientos de poca extensión al sur y este de la Laguna Alalay. Arcillas, arenas y tobas de poca permeabilidad y mínima extensión areal y por lo tanto sin interés para el aprovechamiento de sus aguas.

6.2 Areas de recarga y descarga

Areas de recarga

La principal zona de recarga de los acuíferos del Valle Central, está constituida por los abanicos aluviales. Esta zona de recarga se encuentra en contacto con las rocas paleozoicas que conforman las serranías que se extienden en el sector norte y oeste (Cordillera del Tunari y Mazo Cruz, respectivamente). Los abanicos aluviales en estos sectores son propicios para la infiltración puesto que están constituidos por materiales gruesos de elevada permeabilidad. La recarga se realiza principalmente por la infiltración en los cursos de los ríos y las quebradas que descienden de las cordilleras y en menor grado por el agua empleada para el riego de los terrenos agrícolas y por infiltración directa de las precipitaciones pluviales (Fig. 10 y Fig. 30).

Areas de descarga

La principal zona de descarga coincide con la zona de transición, donde litológicamente existe una alternancia de materiales permeables e impermeables (Fig. 10 y Fig. 30). Si bien hasta hace algunos años eran frecuentes los alumbramientos de las aguas como manantiales, en la actualidad son muy escasos y en algunos casos temporales.

Partes del trayecto del Río Rocha constituyen zonas de descarga, especialmente las áreas de La Mayca (en la

Toro Toro Formation (K): Crops out in small areas in the SW of the sheet and consists of a conglomerate in clayey matrix, shaley sandstones and shales.

Santa Lucia Formation (T): The outcroppings underlie the Morochata formation. The rocks consist of clays and marls with inserted sandstone-, limestone- and shale layers. The upper part of the formation contains clays and marls.

Morochata- Formation (T): It is exposed in a NW-SE striking strip in the western part of the map along the Sipe Sipe- fault system. It consists of a polymictic conglomerate with a sandy to clayey matrix, clayey sandstones and tuffs, which do not provide conditions for the exploitation of groundwater.

Sacaba- Formation (T): Outcrops of little extension south and east of the Alalay lagoon. they consist of clays, sands and tuffs of little permeability and minimum areal extension and therefore without interest for the exploitation of its waters.

6.2 Recharge and discharge areas

Recharge areas

The alluvial cones form large recharge areas of the aquifers of the Central Valley. This area is in contact with the Paleozoic rocks that form the mountainous areas that extend in the northern and western mountain ranges (Ranges of the Tunari and Mayo Cruz, respectively). The alluvial cones in these sectors are favorable for the infiltration because they are formed by coarse materials of high permeability. The recharge happens mainly infiltration from rivers and the gorges that flow down from the ranges and in minor degree from irrigation water or as direct infiltration of the rainwater (Fig. 10 and Fig. 30).

Discharge areas

The main area of discharge is the same as the transition zone, where lithologically exists an alternance of permeable and impermeable materials (Fig. 10 and Fig. 30). Some years ago, artesian waters were frequent, whereas nowadays, they are very scarce and in some cases temporary.

Parts of the course of the Rocha River are areas of discharge, especially the areas of La Mayca (in the area

zona del aeropuerto) y al sur de Vinto, donde convergen los flujos de aguas subterráneas, frecuentemente formando zonas pantanosas (cap. 6.3). En el resto del trayecto dentro del área de investigación, el acuífero y el Río Rocha forman un sistema de intercambio de aguas. Las aguas fluyen hacia el acuífero o vice versa según los gradientes hidráulicos. En períodos de torrenceras, el río alimenta al acuífero, mientras que él acuífero exfiltra al río en épocas de estiaje.

6.3 Piezometría

La piezometría de un acuífero constituye una base primordial y una herramienta importante para la planificación de su aprovechamiento. La calidad de los datos de una red de observación está en función del tiempo de observación y de la ubicación de los pozos.

of the airport) and south of Vinto, where the flows of groundwaters converge, frequently forming swampy areas (ch. 6.3). In the rest of the stretch in the study area, the aquifer and the Rocha River form a system of water interchange. The waters flow towards the aquifer or vice versa according to the hydraulic gradients. In torrential periods, the river feeds the aquifer, whereas the aquifer filters into the river in periods of low water.

6.3 Hydraulic head

Knowledge about the hydraulic head of an aquifer is crucial for the planning of its exploitation. The quality of the data of an observation network depends on the duration of the observation period and the location of the wells.

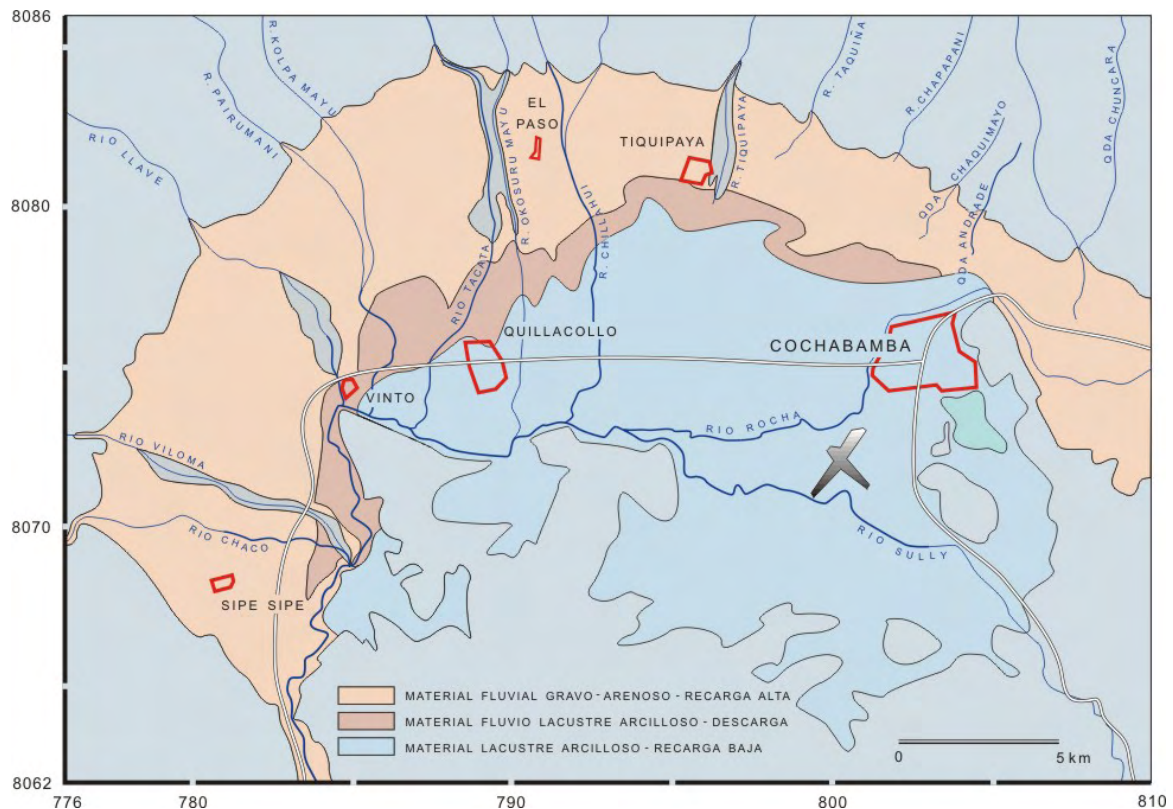


Fig. 30: Zonas de recarga y descarga, según PIRHC, 1978 / Areas of recharge and discharge, according to PIRHC, 1978

En el Valle Central se dispone de información piezométrica continua desde el año 1991 cuando se ha iniciado el muestreo de la red de observación del Proyecto CABAS. Después de una amplia evaluación de las fuentes de agua en el valle, en primera instancia se seleccionaron 39 pozos (perforados y excavados) estratégicamente ubicados (Fig. 31). En cada pozo de observación se midieron, por lo general mensualmente, niveles de agua. Paralelamente, en los pozos de la red de observación se midieron los valores de pH, conductividad y temperatura. Los datos están publicados en el *informe técnico* de CABAS N°55 (1998).

En términos generales, la profundidad de la napa freática en relación con la topografía disminuye progresivamente del área septentrional hacia el centro de la cuenca, habiéndose medido el más profundo (54 m) en la zona inferior del ápice del abanico de El Paso, situado al noroeste de la población homónima.

En la zona de transición se encuentran pozos surgentes que captan acuíferos confinados con niveles piezométricos de varios metros sobre el nivel de la superficie.

In the Central Valley data are available with continuous piezometric information since 1991 when the sampling of the observation network of the CABAS Project began. After a wide evaluation of the water resources in the valley, at first 39 wells (perforated and excavated), strategically placed (Fig. 31), were selected. As a rule in every well of observation, the water levels were measured monthly. In a parallel way, in the wells of the observation network the values of pH, conductivity and temperature were measured. The data is published in the technical report of CABAS N°55 (1998).

In general terms, the depth of the phreatic layer in relation to the topography decreases progressively from the northern area towards the center of the basin, the deepest levels (54 m) has been measured in the lower zone of the apex of the El Paso fan, located in the northwest of the population with the same name.

In the transition zone appear artesian wells with piezometric levels of several meters above surface.

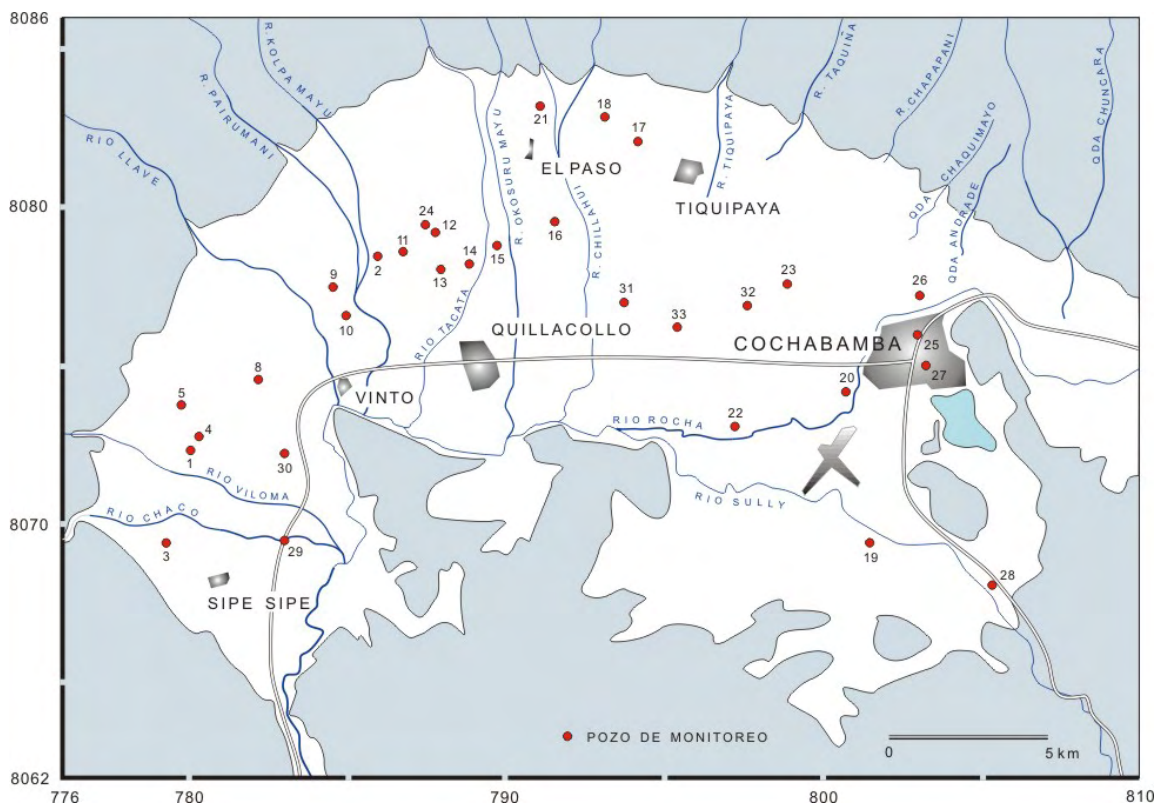


Fig. 31: Red de observación de niveles piezométricos de CABAS / SERGEOMIN / Monitoring network of piezometric levels of CABAS / SERGEOMIN

En la parte topográficamente más baja de la cuenca, donde mayormente se depositaron sedimentos lacustres, el nivel de la napa freática se encuentra a una profundidad de 1 a 5 m (GEBOL - NNUU, 1978).

La variación de niveles es mas pronunciada en el área de recarga (Fig. 33, pozo 287) que en el área de descarga (Fig. 33, pozo 874). Como es de esperar, los niveles varían en función de los eventos de precipitación y las épocas de estiaje (pozo 287). En la zona de transición y de descarga las variaciones del nivel de agua son mínimas por el cercano cauce del Río Rocha (Fig. 33, pozo 874). Para la localización de los pozos, véase Fig. 31. También se observa que, tanto en la zona de recarga como descarga, el nivel medio ha permanecido aproximadamente constante lo que permite la conclusión que, en el tiempo de observación, la explotación de las aguas no ha llegado a superar su recarga.. Se observa un descenso suave entre los años 1993 y 96 y luego una recuperación durante la temporada de lluvia 1996/97.

In the topographically lowest part of the basin, where mainly lake sediments were deposited, the level of the phreatic layer is found at a depth of 1 to 5 m (GEOBOL - UN, 1978).

The variation of groundwater levels is higher in the recharge area (Fig. 33, well 287) than in the discharge area (Fig. 33, well 874). As expected, the levels vary according the precipitation events and periods of low water (Fig. 33). In the transition, zone and zone of discharge the variations of the water level are small due to the near course of the Rocha River (Fig. 33, well 874). For the location of the wells, see Fig. 31. It also can be observed that, in the recharge area as well as in the discharge area, the average level has remained approximately constant. That leads to the conclusion, that, in the time of observation, the extraction of groundwaters has not surpassed its recharge. A gentle descent between 1993 and 96 is observed and afterwards a recovery during the rainy season of 1996/97.

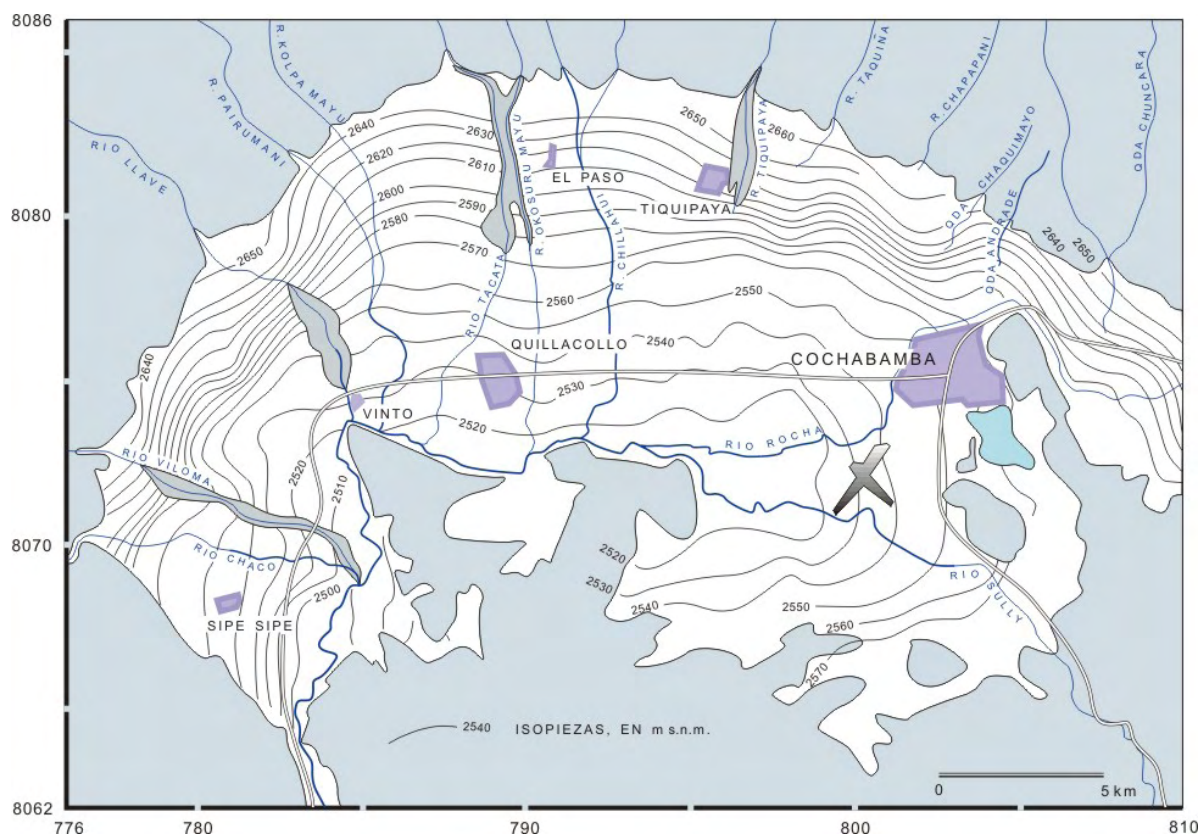


Fig. 32: Mapa piezométrico del Valle Central en base a una combinación de los datos de nivel de CABAS/SERGEOMIN y SEMAPA/BRGM / Piezometric map of the Central Valley based on a combination of the data of CABAS/SERGEOMIN and SEMAPA/BRGM

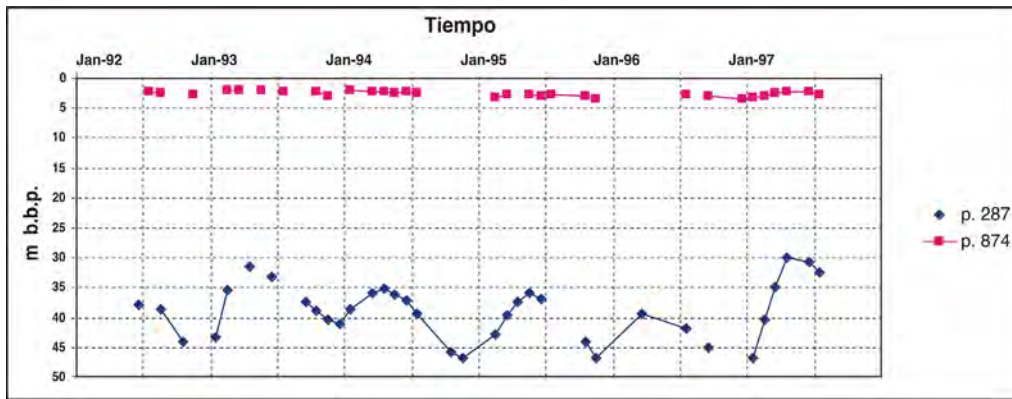


Fig. 33: Variaciones del nivel freático. Los niveles están relacionados a la profundidad bajo boca de pozo. / Variations of the groundwater level. The levels are related at the depth under mouth of well

Aparte de los datos recogidos por CABAS / SERGEOMIN y la información comprendida en el informe del PIRHC, existe un monitoreo complementario efectuado por SEMAPA en una red iniciada por SEMAPA/BRGM y una recopilación y combinación de los datos de ambas instituciones (Fig. 32) para la elaboración de un mapa piezométrico como base para el modelo numérico desarrollado por SEMAPA/BRGM (1994). El mapa piezométrico de la napa del sistema acuífero aluvial ha sido establecido a partir de 724 mediciones confiables de los niveles piezométricos. Representa un estado medio de la napa del acuífero estudiado después del período de recarga. El número elevado de datos piezométricos confiables de los cuales se disponía, repartidos sobre la casi totalidad del valle, garantizan la validez de la información piezométrica.

El flujo general de la napa está globalmente orientado hacia el centro de la cuenca, perpendicularmente a los límites constituídos por los afloramientos paleozoicos, mesozoicos y cenozoicos. La recarga del acuífero por las aguas superficiales provenientes de la cordillera se evidencia por las ondulaciones observadas en las curvas piezométricas por debajo de los principales ríos (Viloma, Llave, Tacata, Tiquipaya) que reflejan la existencia de una alimentación de la napa a partir de estos cursos de agua.

El aspecto de la superficie piezométrica de la napa certifica claramente que el conjunto de los flujos subterráneos converge hacia dos zonas que constituyen la salida de la napa (SEMAPA/BRGM, 1994):

- Una zona situada al oeste del aeropuerto de Cochabamba, correspondiente a la meseta de La Mayca. En este sector, que se distingue superficialmente por la presencia de zonas pantanosas, las aguas

Besides the data collected by CABAS / SERGEOMIN and the information comprised in the report of the PIRHC, there is a complementary monitoring carried out by SEMAPA in a network initiated by SEMAPA/BRGM and a compilation and combination of the data of both institutions (Fig. 32). All this information was used in the elaboration of a piezometric map as base for the numerical model developed by SEMAPA/BRGM (1994). The piezometric map of the layer of the alluvial aquiferous system has been established from 724 reliable measurements of the piezometric levels. It represents an average state of the studied aquifer layer after recharge period. The high number of existing reliable piezometric data distributed over almost the whole valley guarantees the validity of the piezometric information.

The general flow of the layer is globally oriented towards the center of the basin, perpendicularly to the limits formed by the Paleozoic, Mesozoic and Cenozoic outcrops. The recharge of the aquifer by surface waters coming from the Cordilleran range becomes evident with the observed flexions in the piezometric curves below the main rivers (Viloma, Llave, Tacata, Tiquipaya) reflecting the feeding of the layers from these water courses.

The piezometric surface of the layer clearly certifies that the set of the underground flows converges towards two areas that constitute the exit of the layer (SEMAPA/BRGM, 1994):

- One area is located in the west of the airport of Cochabamba, corresponding to the plateau of La Mayca. In this sector, that is superficially distinguished by the presence of swampy areas, the

subterráneas remontan la superficie por drenaje ascendente a través de una cobertura arcillo-arenosa, antes de evaporarse. Probablemente por efecto del mismo proceso, aumenta la salinidad de las aguas subterráneas en esta zona (discutido en cap. 7).

- Una zona localizada en el extremo suroeste de la cuenca. La forma de las isopiezas en este sector sugiere fuertemente la presencia de una salida de la napa donde se forman las numerosas vertientes que surgen en esta región, desde el pueblo de Vinto hasta el pueblo de Suticollo situado en la extremidad del valle.

groundwaters flow up to the surface by ascending drainage through a clayey- sandy coverage before evaporating. Probably, as an effect of the same process, there are increases in the salinity of the groundwaters in this area (discussed in ch. 7).

- The other area is located in the southwestern end of the basin. The form of the isopleth in this sector strongly suggests the presence of an exit of the layer where the numerous springs which flow in this region are formed, from the village of Vinto up to Suticollo situated in the extremity of the valley.

6.4 Parámetros hidráulicos y rendimiento de pozos

Como la mayor parte de la información hidrogeológica, los datos sobre parámetros hidráulicos se encuentran dispersos y con poco análisis integral. Las fuentes que mas integran datos hidráulicos son el banco de datos de CABAS / SERGEOMIN y los trabajos realizados por SEMAPA/BRGM y el PIRHC.

6.4 Hydraulic parameters and well yields

As is the case for most of the hydrogeological information, the data on hydraulic parameters are disperse and with little integral analysis. The largest sources of hydraulic data are the database of CABAS / SERGEOMIN and the works carried out by SEMAPA/BRGM and the PIRHC.

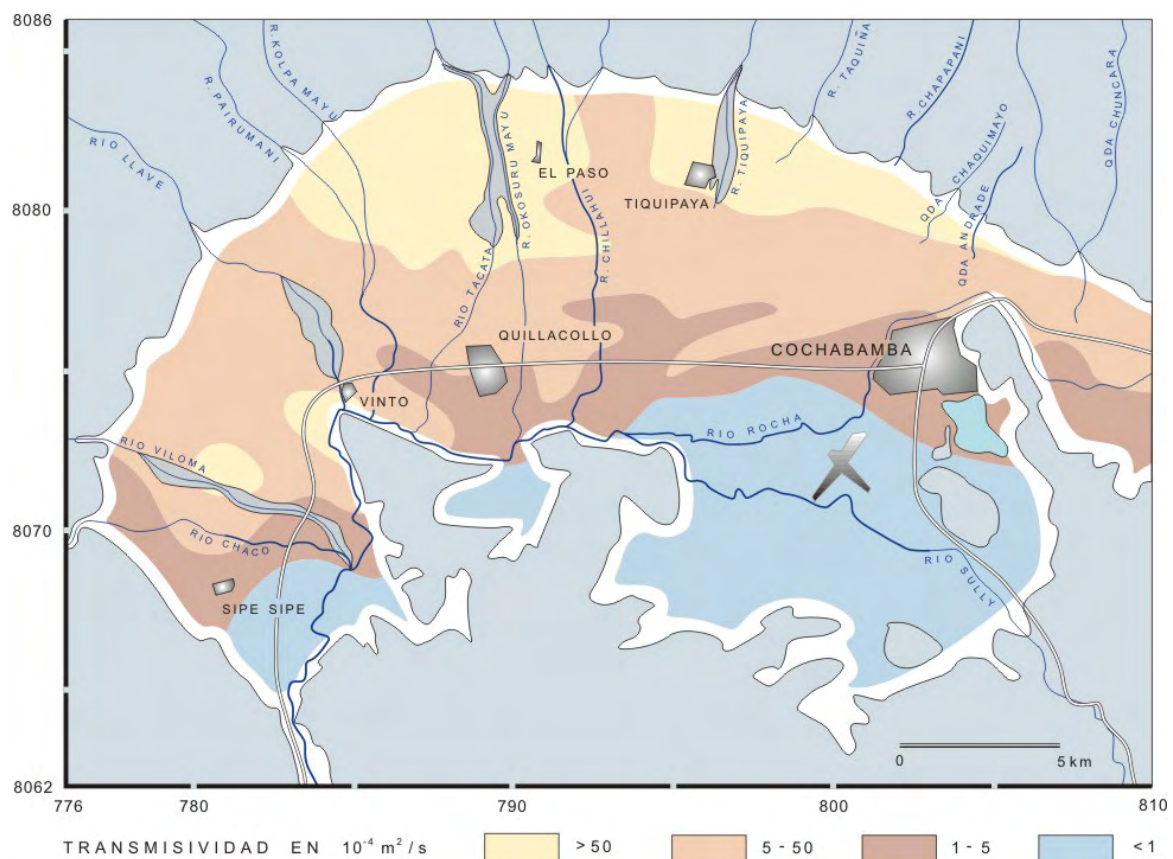


Fig. 34: Mapa de transmisividades del Valle Central y línea de confinamiento (basado en SEURECA-BRGM-SOGREAH-CGL, 1994) / Map of transmissivity of the Central Valley and of confinement line (based on SEURECA-BRGM-SOGREAH-CGL, 1994)

En resumen, los valores de transmisividad más altos (entre $3,5 \cdot 10^{-3}$ a $1,2 \cdot 10^{-2}$ m^2/s) se localizan en la parte intermedia de los abanicos. En la zona de transición los valores de transmisividad varían entre $1,2 \cdot 10^{-3}$ y $3,5 \cdot 10^{-3}$ m^2/s mientras que en la zona lacustre varían entre $1,2 \cdot 10^{-4}$ y $1,2 \cdot 10^{-3}$ m^2/s (Fig. 30). Sin embargo, en esta última zona se pueden encontrar acuíferos explotables en algunas áreas (GEBOL - NNUU, 1978).

Dentro de la cooperación entre SEMAPA y BRGM, se volvieron a interpretar las pruebas de bombeo de 76 pozos en todo el valle que se realizaron en proyectos anteriores y se ejecutaron 38 nuevas pruebas de bombeo. Sobre las 114 pruebas de bombeo se determinó la distribución de la transmisividad.

In summary, the highest values of transmissivity (between $3,5 \cdot 10^{-3}$ to $1,2 \cdot 10^{-2}$ m^2/s) are found in the intermediate part of the fans. In the transition zone, the values of transmissivity vary between $1,2 \cdot 10^{-3}$ and $3,5 \cdot 10^{-3}$ m^2/s whereas in the lacustrine area they vary between $1,2 \cdot 10^{-4}$ and $1,2 \cdot 10^{-3}$ m^2/s (Fig. 30). However, in this latter zone, exploitable aquifers can be found in some areas (GEOBOL - UN, 1978).

In the framework of cooperation between SEMAPA and BRGM, the pumping tests of 76 wells in the whole valley, which were carried out in previous projects were interpreted again and another 38 new tests were performed.

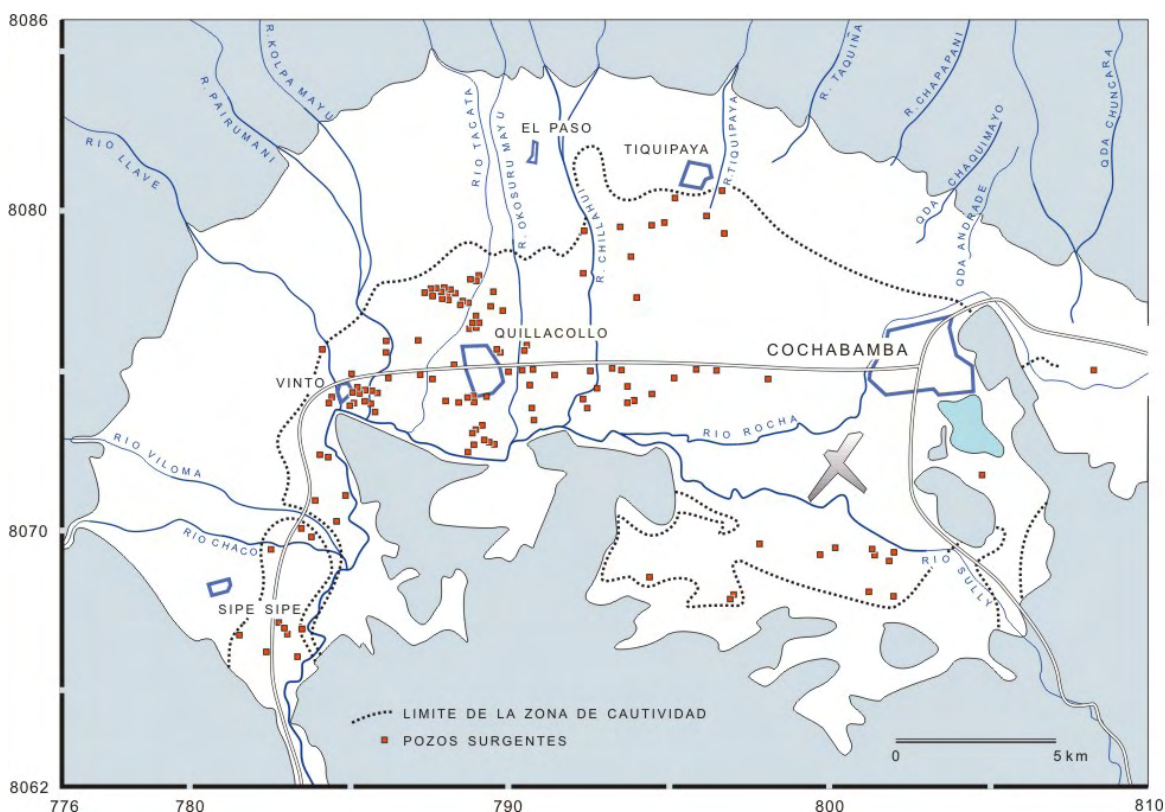


Fig. 35: Línea de confinamiento y pozos surgentes (basado en SEURECA-BRGM-SOGREAH-CGL, 1994) / Extension of confines Groundwater conditions and location of artesian wells (based on SEURECA-BRGM-SOGREAH-CGL, 1994)

En el mapa (

Fig. 34) se muestra la distribución geográfica de la transmisividad (T). De manera general se puede indicar que los valores más altos de T ($> 5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$) se sitúan en la periferia norte y oeste de la cuenca, particularmente en las zonas de El Paso y Vinto oeste mientras los valores más bajos de T ($< 5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$) se encuentran por una parte al este de Quillacollo y por otra parte en el eje de la carretera a Cochabamba, así como al este y al sureste de la cuenca.

En lo que se refiere al coeficiente de almacenamiento, de forma cualitativa se puede constatar que los acuíferos son confinados a semiconfinados en los dos tercios de la cuenca en razón de la presencia de una capa de arcilla más o menos continua en superficie, de 10 a 30 m de espesor, según su localización. La surgencia en la zona de descarga es la mejor prueba de confinamiento (Fig. 35). El acuífero es semiconfinado a libre en el tercio norte y oeste. Esta observación coincide con los datos de coeficiente de almacenamiento publicados por SEMAPA/BRGM que estipulan valores de S superiores a $5 \cdot 10^{-3}$ al norte de la línea de confinamiento (Fig. 35) e inferiores a $1 \cdot 10^{-3}$ al sud de la misma delimitación.

6.5 Balance hídrico

El balance hídrico de un sistema acuífero reúne gran cantidad de información climatológica, orográfica, hidráulica y sobre el aprovechamiento del mismo recurso. En parte sobre estos rubros, pero especialmente en lo que se refiere al aprovechamiento, el cual se produce por un número desconocido de pozos con caudales difíciles de estimar, se dispone de información sumamente imprecisa. Sin embargo, siendo la disponibilidad de agua, la explotación y sobreexplotación temas de interés público en Cochabamba relacionados a la hidrogeología, en lo que sigue presentamos un breve resumen de tres balances elaborados por distintas instituciones. Se desarrollará una comparación entre los conceptos de balance presentados por el PIRHC (GEBOL - NNUU, 1978), el convenio SEMAPA/BRGM (1994) y por MERCADO CONSULTANTS (1996).

El PIRHC (GEBOL - NNUU, 1978), siendo el primer estudio que incluye la elaboración de un balance hídrico, contempla el siguiente concepto: La recarga ocurre durante la estación de lluvias, desde diciembre hasta marzo, por la infiltración de las aguas de los ríos torrentosos provenientes de la cordillera, a través de sus propios cauces. El volumen infiltrado es estimado

The results of the evaluation are shown in a map (

Fig. 34), where the geographical distribution of the transmissivity (T) is displayed. In a general way, it can be said that the highest values of T ($> 5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$) are located in the northern and western periphery of the basin, particularly in the areas of El Paso and western Vinto while the lowest values of T ($5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$) are found for one part east of Quillacollo and for another part, along the road axis to Cochabamba, as well as to the east and to the southeast of the basin.

In reference to the storage coefficient, it can be confirmed qualitatively that the aquifers are confined to semiconfined in the two thirds of the basin, because of the presence of a more or less continuous clayey stratum close to the surface, 10 to 30 m thick, depending on its location. The artesian wells in the area of discharge are the best proof of confinement. The aquifer is semiconfined to free in the northern and western third (Map 3). This observation matches the data of storage coefficient published by SEMAPA/BRGM that assumes values of S above $5 \cdot 10^{-3}$ to the north of the line of confinement (Fig. 33), and below $1 \cdot 10^{-3}$ south of this delimitation.

6.5 Water balance

The water balance of an aquifer system brings together a large quantity of climatological, orographical and hydraulic information and data about the exploitation of this resource. This information is partly imprecise, especially concerning the exploitation, due to an unknown number of wells with unknown pumping rates. Since the availability of water, the exploitation and an eventual overexploitation of the aquifer are subjects of public interest in Cochabamba, as follows a brief summary of three balances provided by different institutions is presented. A comparison will be developed between the balance concepts presented by the PIRHC (GEOBOL - UN, 1978), the SEMAPA/BRGM agreement (1994) and MERCADO CONSULTANTS (1996).

The PIRHC (GEOBOL - UN, 1978), as the first study that includes the elaboration of a hydrologic balance, takes into account the following concept: The recharge happens during the rainy season, from December until March, by the water infiltration of the torrential rivers coming down from the Cordilleran range, through their own river beds. The infiltrated volume is esti-

en 35 a $50 \cdot 10^6$ de $m^3/año$ en base a la esorrentía total medida en 1975/76 en Huarimi Mallcu ($200 \cdot 10^6 m^3/a$) y la determinación del porcentaje de infiltración (15-20%). Luego es contemplada la infiltración directa de la precipitación considerando un 15 % a 20 % de la media anual de la lluvia (650 mm) que se infiltra sobre una superficie de $150 km^2$, llegando así a un volumen de 15 a $20 \cdot 10^6$ de $m^3/año$. La recarga proveniente de riego con aguas superficiales (ríos y lagunas) se estima en 3 a $5 \cdot 10^6 m^3/a$.

Por otro lado, la descarga incluye un volumen de agua extraído del acuífero por evapotranspiración. Considerando una superficie de descarga de $30 km^2$, el volumen de agua evaporada llegaría a ser aproximadamente 13 a $15 \cdot 10^6$ de $m^3/año$. Luego se considera que el flujo base del Río Rocha que aparece a partir de la población de Vinto, proveniente del drenaje de los acuíferos y de los excedentes del agua para riego, habiéndose calculado para los años 1974/75 un valor de $15 \cdot 10^6 m^3$ y para el año 1975/76 un volumen de $22 \cdot 10^6 m^3$, de los cuales 3 - $5 \cdot 10^6 m^3$ se utilizan para riego y no llegan a la salida de la cuenca. Calculando con estos valores, se obtiene para el flujo base, un valor de $18,5 \cdot 10^6 m^3$ como promedio anual.

Entre el volumen extraído mediante pozos se considera una descarga entre 13 y $19 \cdot 10^6 m^3/a$ de agua. La descarga por medio de los afloramientos de agua fue estimada utilizando datos de 51 manantiales que fueron inventariados durante el mes de octubre de 1976. Tomando en cuenta que ese mes representa el de menor flujo de los ojos de agua y que el número de los considerados representa solo el 90 % de los existentes en la zona, la descarga por medio de los manantiales se ha estimado entre 4,7 y $5,5 \cdot 10^6 m^3/año$ de agua. Sumando los componentes, se llega a un balance ubicado entre un déficit de recarga anual de $8,5 \cdot 10^6 m^3$ y un excedente de $29,3 \cdot 10^6 m^3$.

El balance elaborado por SEMAPA/BRGM en el año 1994 dispone de un análisis mas detallado de componentes de flujo. Entre las recargas son consideradas:

El volumen estipulado para el aporte por excedentes de riego se basa en cifras de áreas cultivadas, agua disponible para riego proporcionadas por SEURECA-BRGM-SOGREAH-CGL (1994) y la estimación que el 30 % de las aguas utilizadas para riego se infiltran al recurso, constituyendo de esta manera una recarga del acuífero de $8,4 \cdot 10^6 m^3/a$ (Tabla 9). La cifra para el volumen de la infiltración de aguas superficiales se apoya en los números publicados por SEURECA-BRGM-SOGREAH-CGL (1994), considerando las

matado to be 35 to $50 \cdot 10^6 m^3/year$. To this amount, the recharge through direct infiltration is added, assuming that 15% to 20% of the annual precipitation gets into the groundwater reservoir, yielding a total volume of 15 to $20 \cdot 10^6 m^3/year$. Recharge from irrigation with surface waters is estimated to range between 3 and $5 \cdot 10^6 m^3/a$.

Also the discharge includes a volume of extracted water from the aquifer by evapotranspiration. Considering a surface of discharge of $30 km^2$, the volume of evaporated water would lie between 13 and $15 \cdot 10^6 m^3/year$. Further, the base flow of the Rocha River from Vinto on is considered as exfiltration of the aquifers and irrigation overheads. For the years 1974 / 1975 they are thought to have summed around $15 \cdot 10^6 m^3/a$ and for 1975 / 1976 about $22 \cdot 10^6 m^3/a$. 3 to $5 \cdot 10^6 m^3/a$ of these volumina are reused for irrigation and do not exit the valley. Using these values for calculation, the average water output through base flow would yield $18,5 \cdot 10^6 m^3/a$.

The extracted volume through wells out of the main aquifer are thought to range between 13 and $19 \cdot 10^6 m^3/a$. The discharge through artesian water was estimated using data of 51 springs that were inventoried during October 1976. Their discharge has been estimated between 4,7 and $5,5 \cdot 10^6 m^3/year$. Adding up the components, the balance yields a result between a yearly recharge deficit of $8,5 \cdot 10^6 m^3/a$ and an excess of $29 \cdot 10^6 m^3/a$.

The balance calculated by SEMAPA/BRGM in 1994 has a more detailed analysis of flow components. Among the recharges it should be considered:

The assumed recharge through irrigation is based on data of cultivated areas, available water for irrigation provided by SEURECA-BRGM-SOGREAH-CGL (1994) and the assumption that 30% of the waters used for irrigation infiltrate and reach the resource, producing a recharge rate of $8,4 \cdot 10^6 m^3/a$ (Tabla 9). The calculated volume of infiltrating of surface waters is based on the numbers published by SEURECA-BRGM-SOGREAH-CGL (1994), considering the different surfaces in the valley and their respective infil-

Tabla 8: Parámetros y volúmenes considerados en el balance hídrico de PIRHC (GEBOL - NNUU, 1978) / Parameters and volumes considered in the hydrologic balance of PIRHC (GEOBOL - UN, 1978)

TERMINOS DE BALANCE HIDROGEOLOGICO / HYDROGEOLOGIC BALANCE TERMS		VOLÚMENES / VOLUMES
Precipitación	<i>Precipitation</i>	15 – 20
Flujos superficiales	<i>surface runoff</i>	35 – 50
Agua de riego	<i>infiltration of irrigation water</i>	3 – 5
TOTAL RECARGA	TOTAL RECHARGE	53 - 75
Flujo artesiano	<i>artesian flow</i>	13 – 19
Manantiales	<i>springs</i>	4.7 – 5.5
Evapotranspiración	<i>evapotranspiration</i>	13 – 15
Flujo base	<i>base flow</i>	15 – 22
TOTAL DESCARGA	TOTAL DISCHARGE	45,7 – 61,5

diferentes superficies en el valle y sus respectivas capacidades de infiltración tanto como sus extensiones areales. De esta forma se han obtenido volúmenes de infiltración entre $54,3$ y $68,3 \cdot 10^6$ m³/a que le corresponde a 15 – 20% del volumen de flujos superficiales. El aporte desde las rocas paleozoicas que bordean el valle, como en la mayoría de los trabajos, es considerado negligible.

Entre las salidas de agua del valle se contemplan salidas naturales como salidas difusas por drenaje ascendente, salidas del Río Rocha y por vertientes. En base a la extensión de las áreas de drenaje ascendente (10 km² de zonas húmedas) y asumiendo un factor cultural de 0,7, se llega a una salida por evapotranspiración en zonas de drenaje ascendente de $12,4 \cdot 10^6$ m³/a. La salida de agua vía el lecho del Río Rocha es cuantificada en base al estudio de SEURECA-BRGM-SOGREAH-CGL (1994) que comprende el aforo del caudal base del río y llega a $6,3 \cdot 10^6$ m³/a.

Sin duda la cuantificación de la extracción mediante pozos constituye una gran inseguridad, puesto que se desconoce el número y mucho más el caudal de los pozos de extracción en el valle. Entre los pocos datos duros se encuentran los caudales de los pozos de SEMAPA que llegan a un total de aprox. $9,7 \cdot 10^6$ m³/a. Mediante información de horas de bombeo y caudales medios del banco de datos de CABAS/SERGEOMIN y una inventariación propia en cooperación con CORDEPO y su extrapolación a un número estimado de 2.500 pozos, se ha llegado a un volumen total extraído mediante el bombeo de pozos de $49,4 \cdot 10^6$ m³/a. La relación entre el volumen conocido (pozos de SEMAPA) y el enorme volumen estimado de la explotación de los pozos particulares demuestra la inevitable debilidad de un balance en el Valle Central.

tration capacities as much their areal extensions. This approach yielded volumes of infiltration between $54,3$ and $68,3 \cdot 10^6$ m³/a which equal 15 to 20 % of the volume of superficial flows. The contribution from the Paleozoic rocks that border the valley, as in most of the works, is considered neglectable.

The total outflow of the valley considers natural outflows, such as diffuse ascending drainage, rivers (the Rocha River) and springs. Based on the extension of the areas of ascending drainage (10 km² of humid areas) and assuming a cultural factor of 0,7, the result is an outflow by evapotranspiration in areas of ascending drainage of $12,4 \cdot 10^6$ m³/a. The outflow of water through the course of the Rocha River is quantified according the study of SEURECA-BRGM-SOGREAH-CGL (1994), which included the gauging of the base flow and estimates the outflow to be $6,3 \cdot 10^6$ m³/a.

Undoubtedly the quantification of the extraction through wells is very unreliable, since neither the number nor the flow rates of the pumping wells in the valley are known. Among the few hard data are the pumping rates of the SEMAPA wells which sum up to approx. $9,7 \cdot 10^6$ m³/a. Using information of pumping hours and average flows of the database of CABAS/SERGEOMIN, and an own inventory in cooperation with CORDEPO and its extrapolation to an estimated number of 2.500 wells, a total volume extracted through the pumping of wells of $49,4 \cdot 10^6$ m³/a has been obtained. The relationship of hard data (SEMAPA wells) against the estimated total extracted volume shows the weak point of the balance.

Tabla 9: Balance del modelo conceptual y del cálculo numérico elaborados por SEMAPA/BRGM, 1994 / Table 10: Balance of the conceptual model and of the numerical calculation made by SEMAPA/BRGM, 1994.

TERMINOS DE BALANCE HIDROGEOLOGICO / TERMS OF THE HYDROGEOLOGIC BALANCE		MODELO CONCEPTUAL / CONCEPTUAL MODEL		MODELO HIDRODINAMICO / HYDRODYNAMIC MODEL	
		m ³ /s	10 ⁶ m ³ /a	m ³ /s	10 ⁶ m ³ /a
Irrigación	irrigation	0,27	8,4	0,27	8,4
Infiltración de las aguas superficiales	surface water infiltration	1,72 - 2,16	54,3 a 68,3	1,78	56,1
TOTAL RECARGA	TOTAL RECHARGE	1,99 - 2,43	62,7 - 76,7	2,05	64,5
Extracción por bombeo	well pumping	1,56	49,4		
Recuperación por evaporación	evapotranspiration	0,4	12	1,83	57,8
Salidas por el Río Rocha	runoff via Rio Rocha	0,2	6,3	0,2	6,3
TOTAL DESCARGA	TOTAL DISCHARGE	2,16	67,3	2,03	64,1

Tabla 10: Balance presentado por de MERCADO CONSULTANTS en 1996

TERMINOS DE BALANCE HIDROGEOLOGICO		MIN.	MAX:	ACEPTO / ACCEPTED
Infiltración de aguas superficiales	infiltration of surface waters	22,4	60,8	44
Agua de riego	irrigation water	8	20	12
Pérdidas de la red	losses of the water supply and sewerage system	4	5	4,5
Infiltración de aguas de albañal	sewerage water infiltration	5	6	5,5
Largas de aguas represadas	dam runoff	0,2	0,6	0,5
TOTAL RECARGA	TOTAL RECHARGE	39,6	92,4	66,5
Pozos de SEMAPA	SEMAPA wells	13	14	14
Pozos privados	private wells	25	45	35
Flujo de ríos y filtraciones	river an filtration runoff	6	7	6,5
Evaporación	evapotranspiration	10	12	11
TOTAL DESCARGA	TOTAL DISCHARGE	54	78	66,5

En la Tabla 9 se reúne la información descrita y se compara con el resultado obtenido mediante el cálculo numérico elaborado en el mismo estudio. Como es de esperar, los números no difieren mucho.

En la comparación de los balances del PIRHC y de SEMAPA/BRGM se destaca la gran diferencia en el volumen de la salida por el flujo base del Río Rocha (y obviamente el volumen de extracción de aguas de los pozos de bombeo, que en el informe del PIRHC no ha sido considerado). En el tiempo transcurrido entre la elaboración de los dos informes, los parámetros del balance han cambiado. Especialmente los volúmenes extraídos se han incrementado y por consecuencia el flujo base bajó.

Una de las conclusiones del informe de SEMAPA/BRGM es que la explotación de aguas subterráneas en 1994, por parte de SEMAPA (aproximadamente 300 l/s) podría ser casi triplicada sin afectar el acuífero. Por ser una afirmación controvertida, SEMAPA decidió verificar las recomendaciones del consorcio Francés a través de MERCADO CONSULTANTS (1996). En resumen, la empresa israelita indica que esa política se puede tornar equivocada, especialmente si se consideran las incertidumbres en el esbozo del balance hídrico realizado por el consorcio

In Tabla 9 the information above is brought together and is compared with the result obtained through the numerical calculation elaborated in the same study. As expected, the numbers do not show major differences.

Comparing the balances of the PIRHC and SEMAPA/BRGM, the boldest difference refers to the base flow of the Rocha River and to the water extraction through wells, that in the older report is not considered at all. In the period between the two reports, parameters obviously have changed. Especially the extracted volume have increased, and, as an effect, the base flow decreased..

One of the conclusions of the report of SEMAPA/BRGM is, that the exploitation of groundwater in 1994 by SEMAPA (approximately 300 l/sec) could be almost triple without affecting the aquifer. As this was a controversial statement, SEMAPA decided to verify the recommendations of the French consortium through MERCADO CONSULTANTS (1996). In summary, the Israeli company indicates that these policies could turn out wrong, especially if the uncertainties in the rough draft of the hydrologic balance carried out by the French consortium are considered

francés y yuxtapone un balance modificado (Tabla 9). La tabla que reúne volúmenes sugeridos en varias publicaciones revela la magnitud del rango de inseguridad. Según MERCADO CONSULTANTS (1996) en caso de aumentar la descarga sobre la recarga, el nivel de agua descendería en 1 m de abatimiento regional por cada $5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ de agua sobreexplotada. De esta manera, el incremento de producción de agua subterránea en unos 420 l/s ($13,2 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$) por SEMAPA, produciría un descenso de los niveles de agua subterránea de 1,6 m/año.

and a modified balance is juxtaposed (Tabla 9). The table that brings together the volumes suggested in the mentioned publications, reveals the magnitude of the range of insecurity. According to MERCADO CONSULTANTS (1996) in the case of increasing the discharge over the recharge, the water level would go down in 1 m in regional drawdown for every $5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ of overexploited water. This way, the increase of production of groundwater up to about 420 l/sec ($13,2 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$) by SEMAPA would cause a drop of groundwater levels of 1,6 m/year.

7 HIDROQUIMICA

7.1 Composición iónica

El valle de Cochabamba está caracterizado por una zonificación de las aguas subterráneas en relación a su composición hidroquímica. Prácticamente todos los estudios llegan a la diferenciación de tres o cuatro áreas.

De forma general y extendida a toda la cuenca, el PIRHC fue el primer proyecto en determinar la calidad de los recursos de aguas subterráneas y superficiales. Sus conclusiones se basan en 278 análisis de campo y 87 análisis físico-químicos de muestras de agua de pozos perforados y excavados. En función a la calidad de las aguas subterráneas se han diferenciado 3 zonas, caracterizadas por valores de conductividad diferentes así como aparentemente, por facies químicas distintas. En la Fig. 38 los análisis químicos de las muestras están proyectadas en un diagrama PIPER. Las delimitaciones de las zonas en el valle coincide aproximadamente con la subdivisión determinada por los posteriores estudios, representada en la Fig. 37. Sin embargo, las delimitaciones areales resultan inseguras, puesto que las composiciones químicas del agua en pozos excavados varían considerablemente en relación a las composiciones en los pozos perforados. Esto se puede atribuir a alteraciones de la composición en pozos excavados por procesos de evaporación.

En 1994, el consorcio SEURECA-BRGM-SOGREAH-CGL ha utilizado datos de 107 análisis químicos básicos (pH, alcalinidad, dureza total, turbiedad, conductividad, cloruros), realizados de las aguas subterráneas, recogidas en pozos perforados, pozos excavados y vertientes. Además han sido efectuados 51 análisis completos de las aguas extraídas igualmente de pozos perforados, excavados y vertientes. Los resultados del consorcio SEURECA-BRGM-SOGREAH-CGL coinciden básicamente en relación a la delimitación de las zonas como a la clasificación de las aguas con los resultados que el Proyecto CABAS ha obtenido en sus investigaciones entre 1993 y 1995 y por lo tanto son discutidos conjuntamente. Por el contrario, las zonas y sus características hidroquímicas determinadas por CABAS y SEURECA-BRGM-SOGREAH-CGL en algunos aspectos difieren de los resultados obtenidos por el

7 HYDROCHEMISTRY

7.1 Ionic composition

The chemistry of the groundwater in the valley of Cochabamba varies and can be categorized into different compositions, occurring in different places within the valley. Practically all the studies conclude in the differentiation of three or four areas.

In a general way and extended to the whole basin, the PIRHC was the first project to determine the quality of ground- and surface-waters. Its conclusions are based on 278 field analyses and 87 physico-chemical analyses of water samples from perforated and excavated wells. According to the quality of the groundwaters, three areas have been differentiated, which are characterized by different values of conductivity as well as apparently by different chemical facies. In Fig. 38, the chemical analyses of the samples are projected in a PIPER diagram. The zoning of the valley is more or less the same as presented in latter studies (Fig. 37). However, the areal demarcations are insecure, because the chemical compositions of the water in excavated wells vary considerably in relation to the compositions in the perforated wells. This can be attributed to alteration of the composition in excavated wells by evaporation processes.

In 1994, the SEURECA-BRGM-SOGREAH-CGL consortium used data of 107 basic chemical analyses (pH, alkalinity, total hardness, turbidity, conductivity, chlorides), of groundwater collected in perforated wells, excavated wells and springs. 51 complete analysis of well- and spring-water were added. The results of the SEURECA-BRGM-SOGREAH-CGL consortium match more or less with the delimitation of the areas and the classification of the waters with the results that the CABAS Project obtained in its research between 1993 and 1995 and therefore are discussed jointly. On the contrary, the areas and their hydrochemical characteristic determined by CABAS and SEURECA-BRGM-SOGREAH-CGL, differ in some aspects from the results obtained by PIRHC discussed previously. These differences will be evaluated at the end of the chapter.

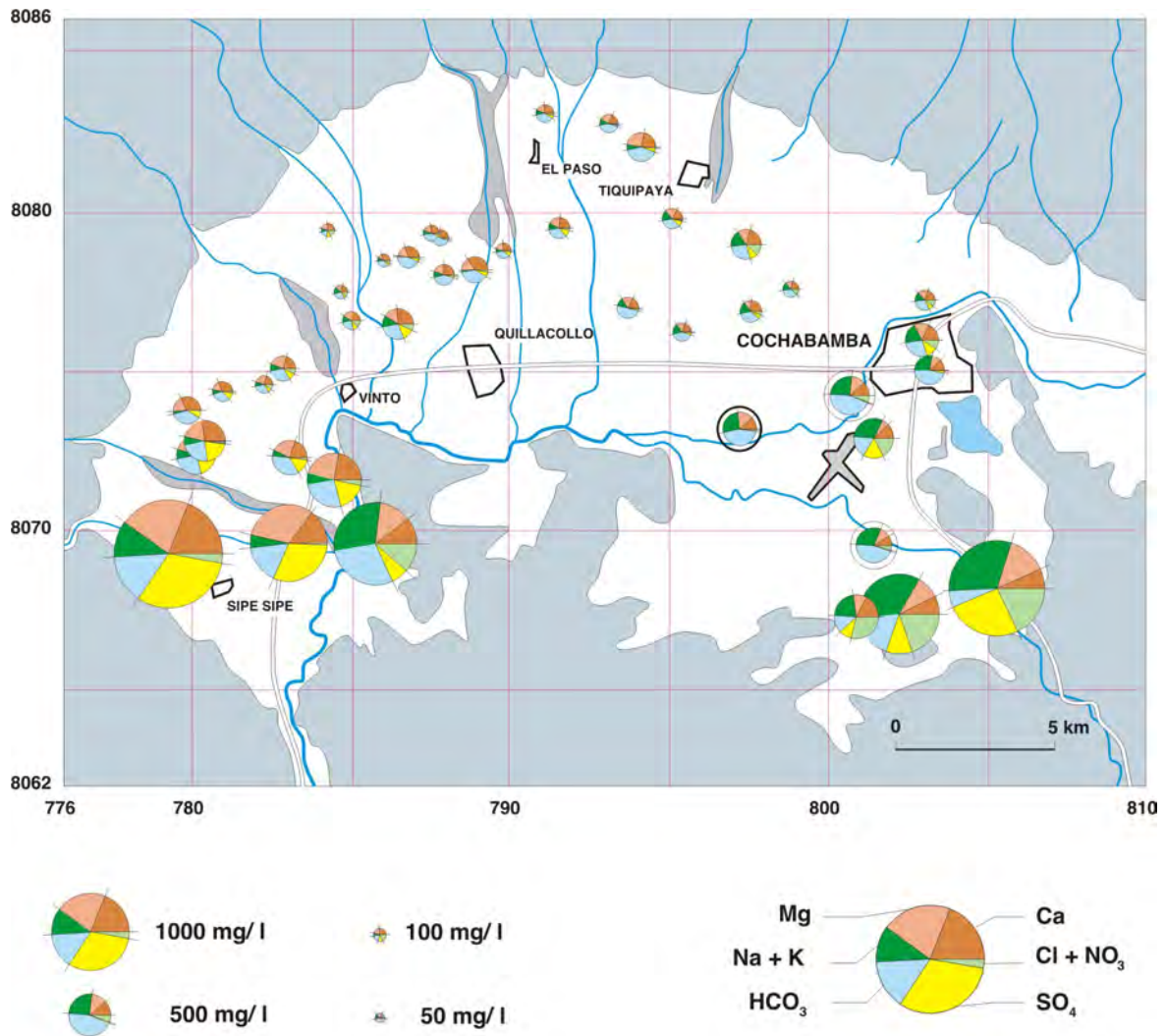


Fig. 36: Mapa de ubicación de puntos de muestreo hidroquímico efectuado por el Proyecto CABAS. Las tortas indican tipo y concentración de los sólidos disueltos en las muestras. La extensión de las tortas es proporcional a la concentración de sales disueltos en la muestra. / Location of hydrochemical sampling points carried out by the CABAS Project. The pies indicate type and concentration of the dissolved solids in the samples. The extension of the pies is proportional to the concentration of salts dissolved in the sample

PIRHC discutidas anteriormente. Estas diferencias serán evaluadas al final del capítulo.

El Proyecto CABAS ha realizado muestreos de aguas subterráneas y superficiales para determinar su calidad y efectuar una clasificación de las mismas. En los años 1993 y 1995, se han extraído 112 muestras de agua de pozos perforados y excavados y de ríos. Las muestras fueron analizadas en el Laboratorio Regional de Control de Calidad de Aguas de la Facultad de Ciencias y Tecnología de la Universidad Mayor de San Simón (UMSS), en Cochabamba. En el laboratorio se analizaron las concentraciones de 12 iones.

The CABAS Project has carried out sampling of underground and superficial waters to determine their quality and to obtain a classification. In 1993 and 1995, 112 water samples out of perforated and excavated wells and of rivers have been extracted. The samples were analyzed in the Regional Laboratory of Quality Control of Waters of the Faculty of Sciences and Technology of the "Universidad Mayor de San Simón (UMSS)", in Cochabamba. In the laboratory, the concentrations of 12 ions were analyzed.

Como único parámetro bacteriológico se analizó coliformes totales. Los resultados de los análisis se encuentran en el anexo N°1. Un valor de cero indica una concentración menor a la del límite de detección. Para cada muestra (Tabla anexo N°1), se han puesto los códigos del banco de datos HYDAT y de GEOBOL. En el anexo se listan los análisis considerados en el mapa (Fig. 36) y el diagrama de PIPER (Fig. 38). Los análisis listados (y representados) constituyen una selección de muestras con el menor error en su balance iónico de cada pozo respectivamente. No se consideraron resultados de análisis con un error del balance iónico mayor al 10%.

En el mapa (Fig. 36) están ubicados los puntos de muestreo y, mediante tortas en forma simplificada, el contenido de sólidos disueltos. El área de las tortas es proporcional al contenido total de sólidos disueltos. En base a los resultados se han diferenciado tres zonas en la cuenca de Cochabamba que presentan características hidroquímicas distintas (Fig. 37).

Total coliforms were analyzed as only bacteriological parameter. The results of the chemical analyses are presented in the annex N°1. A value of zero indicates concentration below the detection limit. For every sample (Table annex N°1), the codes of the HYDAT and GEOBOL database have been used. In the annex the analyses considered in the map (Fig. 36) and the PIPER diagram (Fig. 38) are listed. The listed (and represented) analyses constitute a selection of samples with the smallest error in their ionic balance of every well. Analysis results with an error of the ionic balance larger than 10% have not been considered.

The map (Fig. 36) shows the sample points and, through pies in simplified form, the contents of dissolved solids. The area of the pies is proportional to the total contents of dissolved solids. Based on the results, three areas can be distinguished within the basin of Cochabamba, that present different hydrochemical characteristic respectively (Fig. 37).

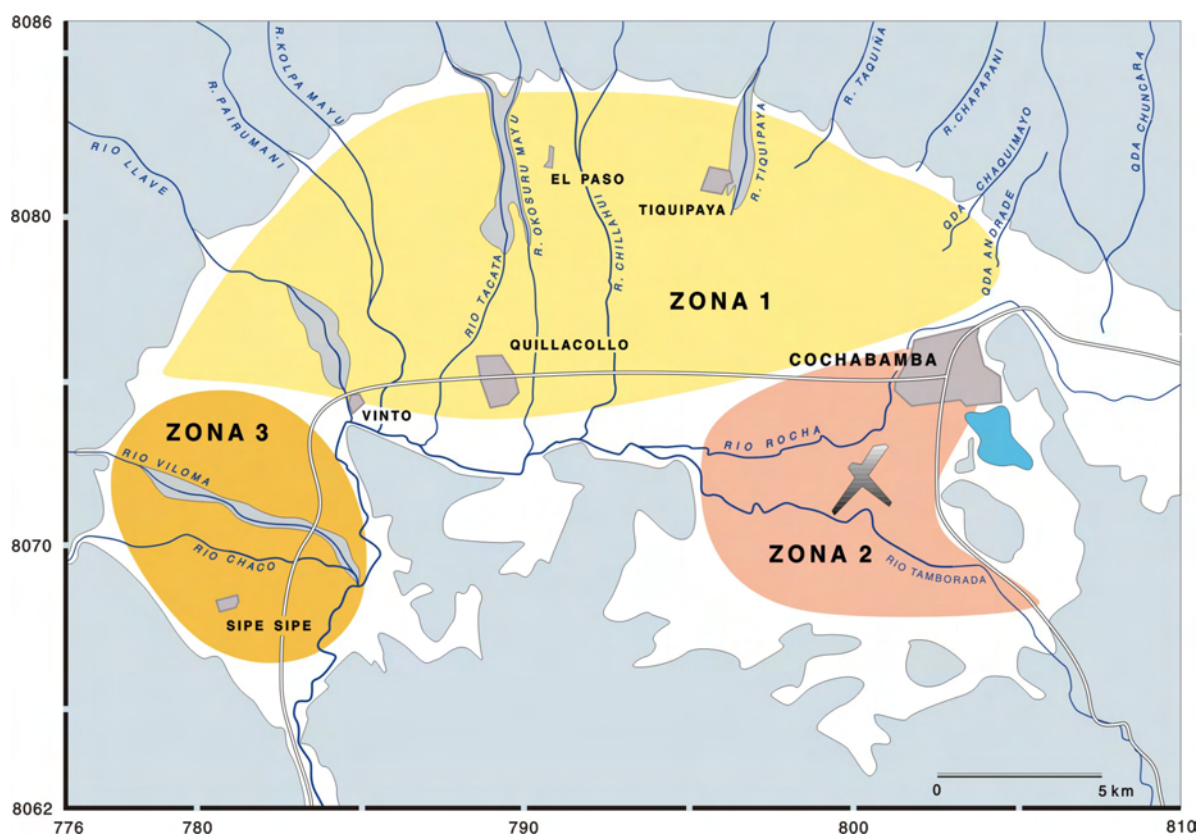


Fig. 37: Zonas hidroquímicas del Valle Central en base a los análisis químicos efectuados por CABAS / Hydrochemical zones of the Central Valley according the chemical analyses carried out by CABAS.

Zona 1: La zona 1 corresponde a las áreas septentrional, central, y occidental del valle y cubre las regiones de Vinto, Quillacollo, Pairumani, El Paso, Tiquipaya y el norte de la ciudad de Cochabamba, tomando el Río Rocha más o menos como límite sur.

Las aguas subterráneas de esta zona presentan una baja mineralización. De allí resultan valores bajos de conductividad de las aguas en el Valle, comprendidas entre 80 y 428 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (SEURECA-BRGM-SOGREAH-CGL) y 103 y 566 $\mu\text{S}/\text{cm}$ según CABAS. Las aguas de esta zona generalmente muestran características bicarbonatadas-calcio-magnésicas.

Zone 1: The area 1 corresponds to the northern, central, and western areas of the valley and covers the regions of Vinto, Quillacollo, Pairumani, El Paso, Tiquipaya and the north of the city of Cochabamba, taking the Rocha River more or less as southern limit.

The groundwaters of this area present low mineralization. This causes low values of conductivity of the waters, comprised between 80 and 428 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (SEURECA-BRGM-SOGREAH-CGL) and 103 and 566 $\mu\text{S}/\text{cm}$ according to CABAS. The waters of this area generally show bicarbonated calcium-magnesian characteristics.

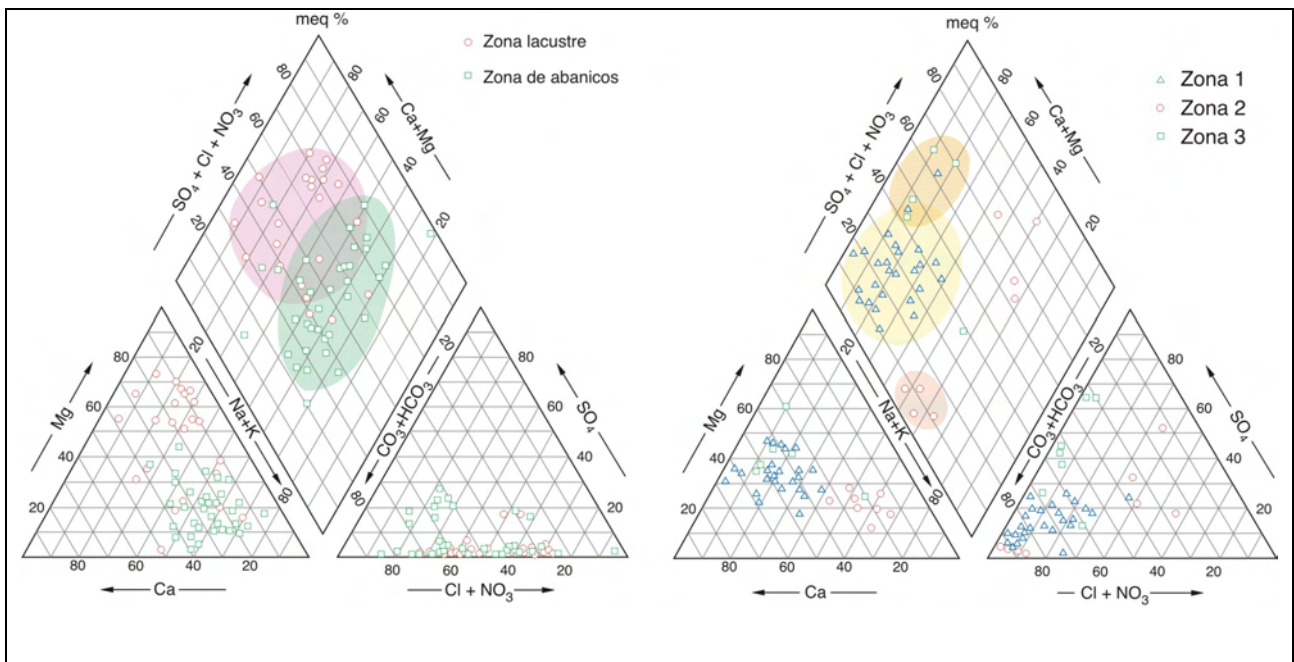


Fig. 38: Diagramas PIPER de los resultados de análisis químicos de las aguas subterráneas obtenidos por el PIRHC (diagrama izquierdo) y CABAS (diagrama derecho) / PIPER-diagrams representing the results of chemical groundwater analysis obtained by PIRHC (left diagram) and CABAS (right diagram)

Discusión: Desde las regiones norte y oeste del valle (región de Vinto, Pairumani, El Paso) se observa en dirección al sureste un aumento de la concentración en sodio y simultáneamente una disminución de la concentración en magnesio. Esta variación progresiva de las facies químicas en la zona 1 se debe explicar por el cambio de la litología del acuífero hacia el sureste (desde gravas y arenas gruesas con poco o muy poco contenido de arcillas a arenas finas y limos arcillosos localmente con características de formaciones depositadas en un contexto evaporítico).

En el sector situado al oeste de Vinto, las aguas subterráneas pueden presentar tenores excesivamente elevados de hierro. Estas altas concentraciones están

Discussion: From the regions north and west of the valley (region of Vinto, Pairumani, El Paso) towards the southeast an increase of the concentration in sodium and simultaneously a decrease of the concentration in magnesium is observed. This progressive variation of the chemical facies in the area 1 must be explained by the change in the lithology of the aquifer towards the southeast (from gravels and coarse sands with little or very little content of clays to fine sands and clayey muds locally with characteristics of formations deposited in an evaporitic environment).

In the sector to the west of Vinto, the groundwaters can present excessively high concentrations of iron. These high concentrations are related to the presence

relacionadas con la presencia de formaciones arcillosas ferruginosas en este sector y al Eh (el potencial de reducción y oxidación) como parámetro determinante para su disolución. Los tenores disminuyen hacia el este de manera relativamente rápida hasta llegar a ser despreciables al este de Vinto. Las concentraciones en manganeso, generalmente muy bajas, pueden localmente alcanzar valores que se encuentran por encima de las normas de potabilidad.

Salta a la vista, que las aguas de los pozos situados en los límites de las zonas 1 y 2, tienen una composición química asimilable a una mezcla de las aguas subterráneas de las dos zonas (ver muestras, 31, 32, 33 en Fig. 36 y en el diagrama de PIPER en Fig. 38).

Zona 2: Esta zona situada en el sureste del Valle cubre el área de la ciudad de Cochabamba incluyendo el aeropuerto, la comunidad de La Mayca y el sector al sud de esta. Las aguas subterráneas de la zona 2 tienen una facies bicarbonatada sódica pura (Fig. 38). Los análisis 19, 20, 22 y 27 de los pozos de ésta zona indican que el aumento de conductividad (477 $\mu\text{S}/\text{cm}$ – 643 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y el TSD de la zona 1 a la zona 2 se debe básicamente al aumento de los iones sodio (51 – 70 mg/l) y bicarbonato (225 – 308 mg/l). Las concentraciones de hierro (max. 6,7 mg/l) y manganeso (max. 5,5 mg/l) son las más altas determinadas de la cuenca.

Las altas conductividades registradas (799 $\mu\text{S}/\text{cm}$ – 2.010 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en los puntos 40, 41, 42, 28, CABAS, IT N° 33, 1995) en su mayoría provienen de pozos excavados y por lo tanto no necesariamente son significativos. También la diferente característica hidroquímica de las mencionadas muestras limita las conclusiones: Las muestras N°28, 40, 41 y 42 de los cuatro pozos de esta zona pertenecen a cuatro diferentes facies: Facies sulfatada sódica (28), facies bicarbonatada sulfatada clorurada sódica (40), facies clorurada sódica (41) y facies bicarbonatada clorurada sódica (42), teniendo como característica común la mayor concentración del catión sodio (75 mg/l - 260 mg/l) (CABAS, IT N° 33, 1995).

Discusión: El mayor contenido de sodio en la zona 2 muy probablemente se debe en lo esencial a una disolución de las formaciones evaporíticas, el lento ascenso de las aguas subterráneas en esta zona y la consecuente evaporación del agua y el enriquecimiento de sodio.

Las aguas pueden presentar concentraciones importantes de hierro que no necesariamente están vinculadas a la presencia de las formaciones silúricas, ricas en hierro, aflorantes en la parte sureste de la cuenca (como postulado por SEURECA-BRGM-SOGREAH-

of ferruginous clayey formations in this sector and to the Eh value (the reduction and oxidation potential) as essential parameter for its dissolution. The tenors decrease towards the east relatively fast until they get to be negligible to the east of Vinto. The concentrations in manganese, generally very low, can locally reach values above the drinking water standards.

It is very obvious, that the waters of the wells located close to the limits of the areas 1 and 2, have a chemical composition similar to a mixture of the groundwaters of both areas (to see samples, 31, 32, 33 in Fig. 36 and in the PIPER diagram in Fig. 38).

Zone 2: This area, situated in the southeast of the Valley, covers the area of Cochabamba City including the airport, the community of La Mayca and the sector to the south. The groundwaters of the area 2 have a pure bicarbonated sodium facies (Fig. 38). The analyses 19, 20, 22 and 27 of the wells of this zone indicate that the increase of conductivity (477 $\mu\text{S}/\text{cm}$ -643 $\mu\text{S}/\text{cm}$) and the TSD of the area 1 to the area 2 is owed basically to the increase of sodium (51 –70 mg/l) and bicarbonate ions (225 -308 mg/l). The iron (at the most 6,7 mg/l) and manganese concentrations (at the most 5,5 mg/l) are the highest values determined in the basin.

The high conductivity registered (799 $\mu\text{S}/\text{cm}$ - 2.010 $\mu\text{S}/\text{cm}$ in the points 40, 41, 42, 28, CABAS, IT N° 33, 1995) originate mainly from excavated wells and are therefore they not necessarily significant. Also the different hydrochemical characteristics of the mentioned samples limits the conclusions: The samples N°28, 40, 41 and 42 of the four wells of this area belong to four different facies: Sulphated sodium facies (28), chloridized sulphated bicarbonated sodium facies (40), chloridized sodium facies (41) and chloridized bicarbonated sodium facies (42), having as common characteristic the highest concentration of the sodium cation (75 mg/l -260 mg/l) (CABAS, IT N° 33, 1995).

Discussion: The highest contents of sodium in area 2 very probably essentially due to a dissolution of the evaporitic formations, the slow rise of the groundwaters in this area and the consequent evaporation of the water and the enrichment of sodium.

The waters can present important concentrations of iron that may come from the iron-rich Silurian formations, which crop out in the southeastern part of the basin (as postulated by SEURECA-BRGM-SOGREAH-CGL, 1994) with Eh as the controlling pa-

CGL, 1994) sino mas bien al Eh como parámetro determinante.

Zona 3: Esta zona, situada en el suroeste de la cuenca cubre los alrededores de Mallcu Rancho, Viloma, Payacollo, Sipe Sipe y Suticollo. La CE relativamente elevada de las aguas subterráneas en esta parte situada al suroeste del valle, varía de norte a sud entre 596 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 1.757 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Discusión: En relación a las aguas de la zona 1 que están almacenadas en sedimentos cuaternarios sobre formaciones ordovícicas, constituidas por limolitas micáceas, la composición de las aguas subterráneas de la zona 3 está relacionada con los sedimentos terciarios y cretácicos, que afloran al occidente de la zona y que consisten de rocas carbonatadas y dolomitas, arcillas rojas, pelitas y de niveles evaporíticos yesíferos. Pertenecen en la parte sud de la zona a la facies sulfatada magnésico-cálcica (muestras N°3 y 29) mientras que las aguas en la parte norte de la zona tienen una facies bicarbonatada sulfatada cálcico magnésica (muestras N°1, 4, 30 y 39) (CABAS, IT N° 33, 1995).

En lo que se refiere a la presencia de hierro en las aguas subterráneas de este sector, como en la zona 1 el elemento seguramente proviene de las rocas arcillosas aflorantes en las proximidades, ricas en hierro, siendo el Eh el parámetro determinante.

Evaluación

Comparando los resultados de este trabajo con las investigaciones hidrogeoquímicas de hace unos 20 años atrás por el proyecto PIRHC (GEOBOL – NN UU, 1978), salta a la vista que la hidroquímica de las aguas subterráneas del Valle Central de Cochabamba aparentemente ha cambiado (Fig. 38), siempre que no hayan existido errores sistemáticos durante el análisis.

El diagrama de PIPER (Fig. 38) insinúa que las características de las aguas se hayan modificado de una facies bicarbonatada y clorurada sódica magnésica a una facies bicarbonatada cálcica magnésica y sódica. Sobre todo llama la atención que la concentración del cloruro en las aguas ha disminuido como también que la concentración del bicarbonato haya subido en los últimos 20 años. Además se puede observar una disminución de las concentraciones de magnesio y sodio y un incremento de concentración de calcio.

Una explicación posible sería la atribución del cambio de la química a la elevada captación de aguas subterráneas en las décadas pasadas. Por el aumento de la explotación se ha ocasionando un descenso considerable del nivel freático, lo que ha causado una disminución del

parameter.

Zone 3: This area, situated in the southwest of the basin covers the surroundings of Mallcu Rancho, Viloma, Payacollo, Sipe Sipe and Suticollo. The relatively high EC of the groundwaters in this part situated in the southwest of the valley varies from north to south between 596 $\mu\text{S}/\text{cm}$ and 1.757 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Discussion: As compared to the waters of the area 1 that are stored in quaternary sediments on Ordovician formations (micaceous siltstones), the composition of the groundwaters of the area 3 is related to the Tertiary and Cretaceous sediments, that crop out to the west of the area and consist of carbonated rocks and dolomites, red clays, pelites, and of evaporitic gypsumiferous levels. The waters in the southern part of the area belong to a sulphated magnesian- calcic facies (samples N°3 and 29) whereas the waters in the northern part of the area have a sulphated bicarbonated magnesian- calcic facies (samples N°1, 4, 30 and 39) (CABAS, IT N° 33, 1995).

Concerning the presence of iron in the groundwaters of this sector, as in area 1 the element probably originates from the outcropping clayey rocks rich in iron in the proximity with the Eh acting as the controlling parameter.

Evaluation

Comparing the results of this work with the hydrogeochemical research of about 20 years ago carried out by the project PIRHC (GEOBOL - UN, 1978), it is apparent that the hydrochemistry of the groundwaters of the Central Valley of Cochabamba have changed (Fig. 35), as long as systematic errors during the analysis can be discarded.

The PIPER diagram (Fig. 35) shows that the characteristics of the waters have changed from a bicarbonated and chloridized sodium magnesian facies to a calcic bicarbonated magnesian and sodic facies. It is particularly remarkable that the concentration of chloride in the waters has decreased whereas the concentration of the bicarbonate seem to have risen during the last 20 years. Also, a decrease of the concentrations of magnesium and sodium and an increase of calcium- concentration can be observed.

A possible reason for these changes might be the increased groundwater extraction through wells. The drawdown caused by the pumping lead to a forced groundwater circulation, less surface water flow and a

caudal de escorrentía superficial y un aumento del flujo subterráneo, por lo que se produciría la dilución de las aguas subterráneas.

7.2 *Análisis bacteriológicos*

En las campañas de muestreo del año 95, también se analizaron las concentraciones de coliformes totales, habiéndose determinado que la concentración de coliformes en las muestras de pozos excavados es mucho más alta que la de los pozos perforados. Esto puede indicar mayor contaminación por aguas residuales en los niveles someros de los acuíferos, donde la mayoría de los pozos excavados se encuentra. Sin embargo, pozos excavados en general tienden a cargar mayor contaminación que pozos perforados.

Las concentraciones de coliformes varían considerablemente entre los meses de marzo y julio. En la mayoría de los casos (20 muestras de 22), la concentración en julio es mucho más baja que en marzo (Anexo 1). Así en los casos más extremos, la UFC (unidades fecales contadas) en el pozo 138 E baja de 54.000 en marzo a 2 en julio y la concentración de UFC en el pozo 150 E baja de 180.000 a 316. Estas variaciones desde el punto de vista hidrogeológico no tienen una explicación, por lo que se presume que se han cometido errores sistemáticos durante el muestreo o durante la determinación en el laboratorio. La divergencia de los resultados de análisis de la muestra doble del pozo XX 57 de marzo 95 muestra que durante el análisis de la misma en el laboratorio se producen errores notables.

7.3 *Aptitud del agua subterránea para consumo humano y para riego*

El dictamen sobre la aptitud de las aguas subterráneas analizadas para consumo humano se realizó en base a los valores guías y límites para agua potable de la Organización Mundial de la Salud OMS (Guidelines for Drinking-Water Quality - WHO 1992). Según los parámetros analizados en la mayoría de las muestras de las aguas subterráneas del Valle Central de Cochabamba, el único parámetro crítico es UFC. Los otros parámetros analizados, con algunas excepciones, por lo general están dentro del rango de los valores límites de la OMS. Por las grandes variaciones en los datos disponibles sobre la contaminación bacteriológica, resulta indispensable una repetición del muestreo.

dilution of formerly mineralized groundwaters.

7.2 *Bacteriological analyses*

The total concentrations of coliforms, analyzed during the sampling campaigns of 1995, showed that the contents of coliforms in the samples of excavated wells is much higher than in the perforated wells. This may indicate a higher pollution due to waste waters in the shallower aquifers, where most of the excavated wells are located. However, excavated wells generally tend to show a higher contamination than perforated wells.

The coliform concentrations vary considerably between March and July. In most of the cases (20 samples of 22), the concentration in July is much lower than in March (Annex 1). In the most extreme cases, the CFU (counted fecal units) in the well 138 E decrease from 54.000 in March to 2 in July and the CFU-concentration in the well 150 E decreases from 180.000 to 316. These variations do not have an explanation from the hydrogeological point of view. It might indicate a systematic error during sampling or during analysis in the laboratory. The differences between the results of a double-checked sample analyzed in the same lab make the results questionable. Therefore, it has not been determined, which of the two respective results (the high or low concentration) reproduces the real situation concerning the bacteriological quality of the sampled water.

7.3 *Aptitude of the groundwater for human consumption and for irrigation*

The comment on the aptitude of the groundwaters for human consumption is made based on guidelines and limits for drinking water of the World Health Organization WHO (Guidelines for Drinking-Water Quality - WHO 1992). According to the analyzed parameters in most of the groundwater-samples of the Central Valley of Cochabamba, the only critical parameter is UFC. The other parameters analyzed, with some exceptions, usually are in the range of the value limits of the WHO. Because of the uncertainty about the bacteriological data, a repetition of the sampling is essential.

En lo que se refiere a los contenidos de sólidos disueltos, hay que tomar en cuenta que solo los parámetros principales han sido analizados y no los oligoelementos y los parámetros orgánicos. Estos, en el caso de concentraciones elevadas en el agua potable, en general pueden tener un efecto más dañino para el ser humano que los parámetros analizados.

Para clasificar el agua subterránea para fines de irrigación se debe tomar en cuenta el total de sólidos disueltos (TSD), la conductividad eléctrica (CE), la relación de adsorción del sodio (RAS) y el boro. El parámetro boro no fue analizado. Para dictaminar sobre la aptitud de las aguas para riego se aplicó la clasificación según RICHARDS, tomando en cuenta la CE y la RAS. Las aguas subterráneas de las zonas 1 y 2 corresponden a las clases C1-S1 y C2-S1, según RICHARDS, y por lo tanto son aguas de baja hasta media salinidad y aguas bajas con sodio, que se pueden usar para la mayor parte de los cultivos en casi todos los suelos. Las aguas subterráneas de la zona 3 son de la clase C3-S1 según RICHARDS y llegan a ser aguas altamente salinas, cuyo uso es apropiado solamente para plantas muy tolerantes a las sales y en suelos con un alto drenaje.

7.4 Estudios isotópicos

Trabajos en materia isotópica en el Vale Central de Cochabamba han sido efectuados por Stimson et al. (1992 y 1993) y Solís & Araguás (1995).

En su relacionamiento de procesos hidráulicos con contenidos isotópicos, Solís & Araguás (1995) constatan que los contenidos de tritio en los pozos profundos en la zona de los abanicos aluviales en el área septentrional del valle son similares a los contenidos de la precipitación actual, cosa que indica la juventud del agua y refleja la dinámica rápida de la recarga en ésta zona del acuífero. De acuerdo a los resultados, los contenidos de tritio (^3H) descienden hacia el sur con la reducción del gradiente hidráulico hasta desaparecer completamente en las proximidades del Río Rocha.

Las actividades de ^{14}C investigadas por los mismos autores en la zona de los abanicos oscila entre 75 y 100 pmc y confirman la juventud de las aguas.

En la zona baja del valle y al sur del Río Tamborada, los contenidos se reducen a 5 pmc. A estos valores, los autores atribuyen edades del orden de 10.000 a 15.000 años.

Los resultados de Solís & Araguás (1995) coinciden básicamente con las presentaciones de Stimson (1992 y 1993), que mediante análisis hidroquímicos e

Referring to the contents of dissolved solids, it has to be taken into account that only the main parameters have been analyzed, not the oligoelements nor the organic parameters. These, in the case of high concentrations in the potable water, may have a more harmful effect on human beings than the analyzed parameters.

To classify the groundwater for irrigation purposes it must be taken into account the total of dissolved solids (TDS), the electrical conductivity (EC), the sodium adsorption ratio (SAR) and the boron. The boron parameter was not analyzed. To decide on the aptitude of the waters for irrigation the classification according to RICHARDS was applied, taking into account the EC and the SAR. The groundwaters of the areas 1 and 2 correspond to the classes C1-S1 and C2-S1, according to RICHARDS, and are of low to middle salinity and waters low in sodium, which makes them appropriate for most of the crops in almost all soils. The groundwaters of area 3 are of class C3-S1 according to RICHARDS and highly saline. They may be used to irrigate plants with a high tolerance towards salt on well drained soils.

7.4 Isotopic studies

Stimson et al. (1992 and 1993) and Solís & Araguás (1995) have carried out isotopic studies in the Central Valley of Cochabamba.

Solís & Araguás (1995) relate hydraulic processes with isotopic contents and confirm that the tritium contents in the deep wells located in the alluvial cones (northern area of the valley) are similar to those of the current precipitation. That proves the youth of the water and the fast dynamics of the recharge in this area of the aquifer. According to the results, the tritium (^3H) values decrease towards the south and disappears completely close to the Rocha River.

The activities of ^{14}C investigated by the same authors in the area of the fans oscillate between 75 and 100 cp. and again confirm the youth of the waters.

In the low area of the valley and in the south of the Tamborada River, the contents come down to 5 cpm. To these values the authors attribute ages in the order of 10.000 to 15.000 years.

The results of Solís & Araguás (1995) basically match the presentations of Stimson (1992 and 1993). By means of hydrochemical and isotopic data he proves

isotópicos comprueba los largos tiempos de residencia del agua subterránea en la parte sureste del valle. Un punto débil en la exposición de Stimson (1992 y 1993) es que no son contempladas las profundidades de los respectivos muestreos, siendo la profundidad determinante para la edad del agua.

Un dato más preciso sobre la edad de las aguas subterráneas en las zonas profundas ha sido obtenido por las investigaciones del Proyecto CABAS. En el pozo de SEMAPA El Paso I se ha realizado un muestreo de agua extraída a profundidades mayores a 186 m. La determinación de edad se ha efectuado a través del contenido de ^{14}C . Los datos obtenidos son:

the long residence times of the groundwater in the southeastern part of the valley. A weakness in the exposure of Stimson (1992 and 1993) is that the depths of the respective sampling are not taken into account, while water age often changes drastically with depth.

A more precise data on the age of the groundwaters in the deep areas has been obtained by the research of the CABAS Project. In the SEMAPA- well El Paso I a water sampling has been carried out extracted at depths larger than 186 m. The age determination has been carried out through the ^{14}C contents. The obtained data are:

Pozo / Well	El Paso I, profundidad: 186 m / Depth: 186
^{13}C	-14,9
Contenido ^{14}C / Contents ^{14}C	10,2 ± 0,7
Edad convencional (años) según ^{14}C / Conventional age (years) according to ^{14}C	18.330 ± 530
Contenido ^3H / Contents ^3H	< 1,2
^{18}O	- 12,10

Las derivaciones standard indicadas para la edad convencional y el contenido de ^{14}C implican todos los posibles errores dentro del proceso de análisis. La probabilidad que la edad real de la muestra se encuentre dentro del marco indicado es de 68%. Aumentando el marco al doble (± 1.060 años), la probabilidad que la edad de la muestra se encuentre dentro del rango es de 95.5 %. La conclusión de este resultado es que, por la misma trayectoria a través de los acuíferos profundos y por la baja permeabilidad en estas zonas, las aguas profundas, por más que se encuentren dentro de la zona de recarga, son definitivamente antiguas y por lo tanto están sometidas a flujos muy lentos.

The standard derivations, indicated for the conventional age and the contents of ^{14}C , imply all the possible errors in the process of analysis. The probability that the real age of the sample lies within the indicated range is of 68%. Increasing the frame for the double (± 1.060 years), the probability that the age of the sample plots in the range is of 95.5%. The conclusion is, that due to the low permeability of the deeper strata, although they are located underneath the recharge area, the waters are old and recharge and flow are slow..

8 MANEJO DEL RECURSO DE AGUAS

Agua subterránea actualmente es el recurso de agua de mayor importancia en el Valle de Cochabamba, y lo seguirá siendo hasta que el sistema de captación y trasvase de Misicuni u otro sistema que colecte aguas superficiales en la cordillera comience a operar. El recurso es limitado y no puede satisfacer toda la demanda, lo que ya en el pasado ha llevado a intereses incompatibles y conflictos violentos entre sus usuarios.

Un conflicto típico se produce a raíz del descenso del nivel freático ocasionado por la explotación intensa de pozos. Este descenso lleva a la disminución del rendimiento de pozos cercanos. Siendo pozos particulares en urbanizaciones marginales, no abastecidas por la red pública de aguas, el efecto es un agravamiento de las condiciones de vida y de salud de la población. El descenso del nivel también ha de disminuir la rentabilidad de la producción agrícola que depende de agua para riego de pozos y por lo tanto debilita la base de existencia de una población campesina, produciendo migración y tensiones sociales. Tanto como efectos sociales y de salud, el descenso de niveles puede producir efectos ecológicos como cambios en la vegetación, drenaje y secamiento de bofedales y en consecuencia un incremento de la erosión, el deterioro del suelo y el incremento de la vulnerabilidad del recurso contra contaminación.

Es de esperar que intereses opuestos relacionados al agua se incrementen en el futuro a raíz del incremento de la población en el valle. Para mitigar conflictos y aprovechar el recurso de la forma mas eficiente, es necesario hacerlo de forma planificada, e.d. obedeciendo a un plan de aprovechamiento.

El objetivo del plan de aprovechamiento ha de ser el aseguramiento de la disponibilidad de agua subterránea en calidad adecuada para los respectivos usos, e.d. el manejo sostenible del recurso de agua.

Un aprovechamiento planificado ha de tomar en cuenta las distintas necesidades - agua potable de mayor y para producción de menor calidad - tanto como los efectos de una explotación del recurso, sean sociales, ecológicos o económicos, ha de priorizar entre intereses opuestos y mitigar conflictos que podrían surgir de ellos.

8 WATER RESOURCE MANAGEMENT

Groundwater at present is the most important water resource within the Cochabamba Valley, and it will continue so until Misicuni or another system that collects surface waters from the cordillera starts operating. The groundwater resource is limited and can not satisfy the demand, which in the past has already led to incompatible interests and violent conflicts between its users.

A typical conflict happens due to the drawdown of water levels caused by local intense exploitation of wells. This descent leads to the decrease of the yield of neighboring wells. The affected wells often lie within suburbs, low income areas, that are not covered by the public water supply system. Less well yields therefore produce an immediate worsening of living conditions and an increase of health risks of the population. The descent of the level also might lead to a decrease of income of the agricultural production that depends on water wells for irrigation. In this way it might weaken the living base of the farmer-population, producing migration and social conflicts. As much as social and health effects, the descent of the levels can cause ecological effects, such as changes in the vegetation, draining and drying out wetlands and subsequently increases erosion, deterioration of the soil, and an increase of the vulnerability of the resource itself against pollution.

It can be expected that opposed interests related to the water will increase in the future because of the growth of the population in the valley. To mitigate conflicts and use the resource in the most efficient form, it is necessary to do it in a planned manner, i.e. according to an exploitation plan.

The goal of the exploitation plan has to be to assure the availability of groundwater at an adequate quality for the respective uses, e.g. the sustainable handling of the water resource.

A planned exploitation has to consider the different needs - drinking water of higher quality and for production of minor quality - as much as the effects of the exploitation of the resource, these being social, ecological or economic. Priority has to mitigate conflicts that might be unchained between opposing interests.

No todos intereses podrán ser satisfechos mediante una explotación planificada, por lo cual es necesario determinar una priorización de necesidades (p.ej. la priorización del abastecimiento de la población con agua potable ante la conservación de bofedales) y estrategias para evitar o mitigar potenciales conflictos con anticipación (p.ej. incluir las zonas sujetas al descenso de niveles freáticos a la red pública).

Al mismo tiempo es necesario implementar medidas para la conservación y la protección del recurso. Estas medidas por su parte pueden estar opuestas a intereses de asentamientos industriales y producción agropecuaria con sus efectos potencialmente contaminantes. De la misma manera, p.ej. el sellamiento de la superficie por asentamientos puede significar un conflicto con la conservación del recurso por disminuir la recarga natural.

8.1 Aprovechamiento sostenible: Términos generales

Un aprovechamiento sostenible del recurso en base a un plan comprende la extracción de volúmenes controlados de aguas del reservorio y la protección del recurso contra la contaminación.

Cantidad de agua y su aprovechamiento sostenible

En términos generales, los volúmenes extraídos del acuífero (por bombeo y descarga natural) no deberían superar los volúmenes de recarga. El balance de recarga y descarga no necesariamente tiene que estar equilibrado en el período de un año. Si hay pronunciadas variaciones pluviométricas sobre un período de varios años, los volúmenes explotados pueden reponerse en el acuífero en años de elevadas precipitaciones como se ha visto en el período representado en la Fig. 33.

Teóricamente, los regímenes adecuados de explotación pueden ser determinados en base a un balance hídrico que contempla la recarga y descarga natural y artificial en función de parámetros climáticos e hidráulicos.

En la práctica, la determinación de los parámetros con exactitud es muy difícil. Especialmente en regiones de fuerte relieve, los parámetros climáticos e de infiltración pueden variar ampliamente incluso en áreas pequeñas. Así se explican las grandes diferencias entre los balances hídricos de la misma zona elaborados por distintos autores (cap. 6.5).

Not all interests will be satisfied by a planned exploitation. Therefore it is necessary to determine a prioritization of needs (e.g. the prioritization of the supply to the population with drinking water against the conservation of wetlands) and strategies to avoid or mitigate potential conflicts with anticipation (e.g. to include the areas subject to the descent of groundwater levels to the public drinking water supply).

At the same time, something has to be done about the conservation and the protection of the resource. The things to be done might be opposed to industrial settlements or agricultural production with their potentially contaminating effects. Another example is the sealing of the surface by settlements which might lead to a conflict with the necessity to conserve natural recharge of the resource.

8.1 Sustainable use: General terms

A sustainable exploitation of the resource according to a plan includes the extraction of controlled volumes of water of the reservoir and the protection of the resource against pollution.

Quantity of water and its sustainable use

In general terms, the volumes extracted from the aquifer (by pumping and natural discharge) should not surpass the volumes of recharge. The balance of recharge and discharge does not necessarily has to match in a year's period. If there are pronounced pluviometric variations during a period of several years, the extracted volumes can be replaced in the aquifer in years of high rainfalls as it has been seen in the period represented in Fig. 33.

Theoretically, the adequate regimes of exploitation can be determined based on a hydrologic balance that contemplates the recharge and its natural and artificial discharges taking into account all relevant climatic and hydraulic parameters.

In reality, the exact determination of the parameters is very difficult. The climatic and infiltration parameters can vary widely even in small areas especially in regions with strong relief. The great differences between the hydrologic balances of the same area given by different authors can be explained through this (ch. 6.5).

Por lo tanto el balance puede ser una base para la planificación. En la práctica las condiciones y los cambios hidráulicos necesitan ser observados continuamente mediante un sistema de monitoreo que se constituye de un cierto número de pozos de observación. De tal forma, si el nivel es abatido por debajo de lo deseado, los regímenes de bombeo han de ser adaptados y el plan de explotación ha de ser modificado.

En la actualidad, en el Valle Central, el aprovechamiento no obedece a un plan que tenga el objetivo de un manejo sostenible. A pesar de ello, el aprovechamiento del acuífero hasta la actualidad no constituye una sobreexplotación en el sentido de extraer mayores volúmenes que el volumen de recarga. De acuerdo a las mediciones de niveles freáticos efectuadas en el marco del Proyecto CABAS, los niveles han disminuido suavemente entre los años 1992 y 1997 y luego recuperado y superado su nivel inicial tras las fuertes precipitaciones en el verano del 96/97.

Calidad de agua y protección del recurso

La mayor amenaza para un reservorio de aguas subterráneas, especialmente si se trata de áreas densamente pobladas, son contaminaciones por actividades industriales, agropecuarias y desechos humanos.

Una vez contaminado, es muy difícil recuperar un reservorio de aguas subterráneas, pues las velocidades de flujo son muy lentas y los tiempos de permanencia pueden variar entre días (sistemas kársticos) y miles de años en grandes sistemas porosos (no tomando en cuenta sistemas con aguas no renovables que pueden contener aguas de millones de años de antigüedad).

Por tanto, áreas de explotación exigen ser protegidas contra la contaminación para garantizar volúmenes de agua de calidad apropiada para el abastecimiento y asegurar la inversión en la construcción del pozo mediante áreas de protección y restricciones de actividades dentro de ellas. Para proteger el reservorio contra la contaminación por actividades humanas, es necesario implementar un ordenamiento territorial. Dentro de un ordenamiento territorial tiene que asignarse áreas apropiadas a actividades potencialmente contaminantes tanto como áreas protegidas contra la contaminación para pozos de explotación de aguas subterráneas. El área de protección ha de ser una zona en la cual se restringe el uso de la tierra a actividades que no amenazan en forma sustancial al volumen aprovechable del recurso subterráneo.

Therefore, the balance can be a base for planning process. In practice, the conditions and the hydraulic changes need to be observed continuously through a monitoring system that comprises a certain number of observation wells. That implies that if the level is brought down below the desired point, the pumping regimes have to be adapted and the operating plan has to be modified.

At present, in the Central Valley, the exploitation does not obey a resource management plan. Nevertheless, the extracted volumes of the aquifer, up to now, do not exceed the recharge volumes. In other words, the aquifer is not overexploited. According to the groundwater monitoring done by CABAS, the levels did slightly decrease between 1992 and 1997 and afterwards recovered completely with the strong rainfalls in 1996/97.

Water quality and resource protection.

The biggest threat for a groundwater reservoir, especially in densely populated areas, is pollution by industrial activities, by agriculture and human waste.

Once contaminated, it is very difficult to recover a groundwater reservoir, because the flow velocities are very slow and the times of residence in great porous systems (not taking into account systems with not renewable waters that can contain waters of millions of years of age) can vary between days (karstic systems) and thousands of years.

Therefore, groundwater resource areas demand to be protected against pollution to guarantee water volumes of appropriate quality for the supply and to guarantee the investment for well construction through areas of protection and restrictions of activities. To protect the reservoir against pollution, land use has to obey a regulation of land use. In such a regulation, appropriate areas for potentially contaminating activities have to be assigned as much as areas protected against pollution of groundwater wells. The protection area has to be an area in which the use of the land is restricted to activities that do not threaten in substantial form the groundwater resources.

Debido a la característica filtrante y purificante de los acuíferos, por lo general no se protege toda la superficie del acuífero, sino un área circundante de la zona de explotación. Actividades con mayor potencial de contaminación han de ser localizadas a mayor distancia de las áreas de explotación que actividades menos amenazantes para la calidad de agua.

Aparte de esta generalidad, las medidas de protección de las áreas se rigen según la vulnerabilidad del recurso y del pozo, la cual es determinada por la presencia de capas sobreyacentes impermeabilizantes, velocidades de flujo en el acuífero y la posición entre área de recarga y área de descarga. El tamaño de las áreas de protección se rige según las velocidades de flujo en el acuífero, su orientación está en función de la dirección de flujo.

Las medidas de protección deben restringir actividades industriales que emiten materias nocivas (especialmente si es en forma líquida) o agropecuarias vinculadas al uso de fertilizantes, herbicidas y pesticidas. Tiene que restringirse el transporte de sustancias nocivas en grandes cantidades a través del área de protección.

8.2 Aprovechamiento sostenible en el Valle Central

Actualmente, las aguas del Valle Central son aprovechadas indiscriminadamente. Se desconoce el número de pozos de producción y más aún los volúmenes de agua extraídos del acuífero por particulares e industrias. Las estimaciones indican números de pozos entre 2.000 y 10.000 en el Valle Central. Es obvio, que no será posible de implementar un plan de manejo del recurso de aguas, mientras no haya un inventario fiable de pozos y volúmenes de extracción y sobre todo la herramienta legal para fiscalizar la explotación mediante pozos.

Bolivia hace años está a la espera de una Ley de Aguas. Recién su vigencia y reglamentación ofrecerá la base para un aprovechamiento sostenible del recurso.

Entre las zonas apropiadas para la explotación, la zona septentrional actualmente es la más explotada por presentar las condiciones más favorables para la extracción de aguas subterráneas mediante pozos. Almacenan grandes volúmenes de agua, son altamente permeables, permiten altos caudales de explotación y disponen de agua de alta calidad.

Due to the filtering and purifying characteristic of the aquifers, as a rule, not the whole surface of the aquifer, but an area surrounding the exploitation area has to be protected. Activities with major potential of pollution have to be located at a greater distance of the exploitation areas than activities that are less threatening for the water quality.

Apart from this general delineations, the measures in order to protect the resource have to depend on the vulnerability of the resource and of the well (which is in turn determined by the presence of overlying impermeable strata), flow velocities in the aquifer and the position between area of recharge and area of discharge. The size of the protection area depends on the flow velocities in the aquifer, its orientation depends on the flow direction.

The measures to protect the resource have to restrict industrial activities that emit noxious matters (especially in liquid phase) or agricultural activities that apply fertilizers, herbicides and pesticides. The transport of noxious substances in great quantities through the protection areas has to be restricted.

8.2 Sustainable use in the Central Valley

At present, the waters of the Central Valley are used indiscriminately. The number of operating wells is not known, and even less known are the water volumes extracted from the aquifer by private persons and industries. The estimations indicate numbers of wells between 2.000 and 10.000 in the Central Valley. It is obvious that it will not be possible to put into practice a water resource management plan, as long as there is not a reliable inventory of wells and their pumping rates and especially the legal tool to control exploitation through wells.

For years, Bolivia is waiting for a waters law. Only an adequate legislation and its implementation will assure a sustainable exploitation of the resource.

Among the appropriate areas for the exploitation, the northern area at present is the best exploited due to its favorable conditions for the extraction of groundwaters through wells. Large volumes of water are stored here; the rocks are highly permeable, so they allow high flow rates and have high quality water.

Para conservar el recurso, el área de explotación debería ser altamente protegida mediante restricciones hacia asentamientos industriales, la emisión de aguas servidas domésticas e industriales y la deposición de desechos domésticos o industriales. Esto es especialmente importante por ser una zona de alta permeabilidad vertical y lateral, resultando altamente vulnerable. Un contaminante fácilmente ingresa al acuífero y rápidamente se propaga hacia las captaciones de agua.

Actualmente el aprovechamiento del acuífero en el Valle Central no está acompañado por medidas de protección del acuífero contra contaminación. Ya en la actualidad se pueden observar actividades que tarde o temprano definitivamente llevarán a una degradación de calidad (y por lo tanto de la cantidad disponible) a raíz de actividades humanas.

En medio pueblo se encuentran basurales, muchas veces a distancias imprudentes de pozos de agua. Se vierten depósitos no seleccionados y no hay control de calidad en los pozos de aguas adyacentes.

Gran parte de los efluvios industriales no son sujetos a control de calidad; no hay información sobre la carga de contaminantes industriales almacenada en el subsuelo y hay información incompleta sobre los efluvios nocivos arrojados actualmente. Sobre todo las zonas con asentamientos industriales presentan síntomas de fuerte contaminación ambiental como eutrofización de las aguas superficiales en los alrededores de mataderos (p.ej. área de Colcapirhua). Otros contaminantes no producen efectos tan claramente visibles sino exigen análisis hidroquímicos

La zona septentrional, por ofrecer fácil acceso a agua, es también zona de asentamientos industriales agropecuarios como granjas avícolas e invernaderos, cuyas emisiones constituyen una amenaza para la calidad de las aguas subterráneas. Los asentamientos de producción industrial en el área septentrional, por ser área de recarga son especialmente críticos, pues si se contamina esta zona, el agua contaminada escurre hacia el cauce y la contaminación se propaga a través de todo el acuífero.

Un mejoramiento de las condiciones actuales se producirá recién cuando se implementen las pautas existentes, sobre todo la Reglamentación en Materia de Contaminación Hídrica (del año 1995) de la Ley del Medio Ambiente (año 1992).

To preserve the resource, these areas should be strictly protected through restrictions against industrial settlements, the emission of domestic and industrial waste waters and the deposition of domestic or industrial wastes. This is especially important because it is an area of high vertical and lateral permeability, being highly vulnerable. A pollutant easily enters the aquifer and quickly spreads towards the water wells.

At present, the exploitation of the aquifer in the Central Valley is not complemented by measures in order to protect the aquifer against pollution. Already at present, activities can be observed that sooner or later will definitely lead to a degradation of quality (and therefore of the available quantity) as a result of human activities.

Garbage dumps are found in the middle of villages around Cochabamba, many of them at short distance from water wells. Unselected garbage is poured into them and there is no quality control of the waters in the adjacent wells.

Many of the industrial effluents are not subject to quality control; there is no information available on the burden of industrial pollutants stored in the underground and there is incomplete information on the noxious effluents at present. Especially the areas with industrial settlements show symptoms of strong environmental pollution as eutrophication of the superficial waters around slaughterhouses (e.g. area of Colcapirhua). Other pollutants do not cause such clearly visible effects but require hydrochemical analysis.

The northern area offers easy access to water and therefore became a preferential area for agricultural industry as poultry farms and greenhouses, whose emissions constitute a threat for the quality of the groundwaters. The industrial settlements in the northern area are especially critical. It is the recharge area, which means that, if this area is contaminated, the polluted water drains towards the Rocha River and the pollution spreads through the whole aquifer.

An improvement of the current conditions might already be achieved if the existing guidelines, especially the regulation concerning hydric contamination (of 1995) and the environmental law (1992), were put into practice.

En términos de protección del recurso de agua contra la contaminación, la Ley del Medio Ambiente ofrece suficientes herramientas legales para controlar y reducir la emisión de contaminantes a los cuerpos de agua. Las competencias y responsabilidades están claramente distribuidas entre el Ministerio de Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente por un lado y la Prefectura por el otro. Incluyen la competencia de "...identificar las fuentes de contaminación...", "...otorgar permisos de descarga de aguas residuales crudas o tratadas...", "...ejecutar las acciones de prevención de la contaminación de los cuerpos de agua, saneamiento y control de calidad hídrica...", e incluso de "...aplicar la herramienta del ordenamiento territorial...". Es sobre todo la herramienta del ordenamiento territorial que permitiría un mejoramiento eficaz para el aprovechamiento sostenible del recurso de agua. A través de un ordenamiento territorial debería separarse áreas de explotación y áreas de asentamientos peligrosos en términos de contaminación del subsuelo.

La mayor parte de las aguas subterráneas del Valle Central es apta para el consumo humano. Únicamente en las regiones al sureste y suroeste del valle se encuentran aguas de salinidades por encima de los límites permisibles para consumo humano.

En términos generales, asentamientos industriales y potenciales emisores de materia nociva al subsuelo han de ubicarse hacia el sur del valle por dos razones: (1) En ésta zona, el acuífero se encuentra cubierto y protegido por espesas capas de arcilla y limo contra la rápida infiltración de contaminantes y (2) el sur del valle es la zona de descarga; una eventual contaminación no afectaría todo el acuífero sino solamente el agua subterránea que fluye abajo hasta su punto de descarga en el Río Rocha.

En todo caso, las aguas residuales tienen que ser sometidas a un tratamiento antes de volver al sistema natural. El tratamiento, resp. el grado de limpieza tiene que estar en función a su procedencia (industrial o doméstica), su grado de contaminación, su posterior uso o su trayecto en el sistema natural.

Referring to protection of the water resource against the pollution, the Law of the Environment offers sufficient legal tools to control and reduce the emission of pollutants to the water bodies. The competences and responsibilities are clearly distributed between the Ministry of Sustainable Development and Environment on the one hand and the Prefecture on the other one. It includes the definition of responsibilities to "...identify the pollution sources...", "...issue licenses to emanate raw or treated wastewater...", "...execute the actions of prevention of the pollution of the water bodies, recovery and control of the hydric quality...", and even to "...apply the tool of the territorial law...". Especially the tool of the territorial law would allow for an effective improvement for the sustainable exploitation of the water resource. By means of a territorial law, agricultural industry and areas of hazardous settlements, should be separated from groundwater exploiting areas.

Most of the groundwaters of the Central Valley are suitable for the human consumption. Only in the areas in the southeast and southwest of the valley store waters of salinity above permissible limits for human consumption. However, the exploitation is mainly placed in the northern area.

In general terms, industrial settlements and potentially hazardous activities to the resources, have to be placed towards the south of the valley for two reasons: (1) In this area, the aquifer is covered and protected by thick strata of clay and mud against the fast infiltration of pollutants and (2) the south of the valley is the area of discharge; an eventual pollution would not affect the whole aquifer but only the groundwater flow downwards to its discharge point in the Rocha River.

In any case, the wastewaters have to be submitted to a treatment before returning to the natural system. The treatment or the degree of cleaning respectively has to be according to its origin (industrial or domestic), its degree of pollution, its posterior use or its way in the natural system.

En este contexto también cae la discusión sobre el precio del agua. El *costo real*, que contempla el agua como materia reutilizable e incluye el tratamiento del agua para su posterior uso o realimentación al acuífero sin contaminarlo. Este costo obviamente es mucho mayor que el precio actual del agua comercializada en Cochabamba y toda Bolivia, el cual resulta únicamente del costo de bombeo y del mantenimiento y la extensión de la infraestructura de distribución. No es muy probable, que el abastecimiento de agua en Bolivia a largo plazo pueda efectuarse sin subvenciones.

At this point, the discussion about water prices has to be raised. The real cost of drinking water, which considers water a recyclable substance, has to take into account costs of treatment in order to obtain water, which can be released into the natural system without contaminating it. This *real cost* obviously is much higher than the current price of the water marketed in Cochabamba and all Bolivia, which results only from the cost of pumping and of the maintenance and the extension of the distribution infrastructure. It is not likely, that on the long run, water suppliers in Bolivia will managed to provide water to the population without subventions.

9 RESUMEN Y CONCLUSIONES

Entre los años 1991 y 2000, los Gobiernos de la República de Bolivia y la República Federal de Alemania mantuvieron una cooperación a nivel técnico en materia de aguas subterráneas, formando el "Convenio Alemán – Boliviano de Aguas Subterráneas" (CABAS). Los entes ejecutores de la cooperación han sido el Departamento de Hidrogeología del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERGEOMIN) para Bolivia y el Instituto Federal de Geociencias y Recursos Naturales (BGR) para Alemania.

La cooperación se efectuó con el objetivo de capacitar a personal técnico en la institución boliviana en materia de exploración y alumbramiento de recursos de aguas subterráneas mediante tecnología moderna a través de seminarios y la ejecución conjunta entre personal alemán y boliviano. En la última etapa del proyecto, se agregaron temas relacionados al manejo y a la protección de los recursos de agua.

Las operaciones de exploración y alumbramiento estaban concentradas en el Valle Central de Cochabamba, el Chaco Boliviano, las Pampas de Lequezana al norte de Potosí, la ciudad de Tarija y en el Salar de Uyuni. Entre estas zonas, la más estudiada ha sido la del Valle Central. Mediante la aplicación de variadas tecnologías de investigación se ha obtenido información que, junto a los trabajos hechos anteriormente por otras instituciones, ha llevado a una imagen detallada del sistema de aguas subterráneas en el Valle Central, cuyas delineaciones principales son resumidas en lo que sigue:

El Valle Central de Cochabamba constituye una depresión intramontana ubicada en la Cordillera Oriental. Su base se sitúa a aproximadamente 2.500 m s.n.m. y se encuentra circundada por la cordillera, que en la parte septentrional sobrepasa los 5.000 m de altura.

Es de suponer que la formación del valle comenzó en el Terciario superior. Sin embargo, hasta la fecha no se han alumbrado sedimentos depositados en el Valle Central de esa antigüedad, sino solamente en el Valle de Sacaba, al cual es atribuido una historia comparable.

Los depósitos en el valle provienen de la cordillera

9 SUMMARY AND CONCLUSIONS

Between 1991 and 2000, the Governments of the Republic of Bolivia and the Federal Republic of Germany maintained a technical cooperation on the subject of groundwaters, establishing the "German - Bolivian Agreement of Groundwaters (Convenio Alemán – Boliviano de Aguas Subterráneas, CABAS). The performing institutions of the cooperation were the Department of Hydrogeology of the National Service of Geology and Mining (SERGEOMIN) for Bolivia and the Federal Institute of Geosciences and Natural Resources (BGR) for Germany.

The cooperation was carried out with the goal of training technical staff in the Bolivian institution at the exploration and capturing of resources of groundwaters using modern technology through seminars and training on the job with German and Bolivian staff. In the last stage of the project, subjects related resource management and protection were added.

The project operations were concentrated in the Central Valley of Cochabamba, the Bolivian Chaco, the Pampas de Lequezana in the north of Potosí, the city of Tarija and in the Salar of Uyuni. Among these areas, the most studied has been that of the Central Valley. Through the application of different research technologies, information has been obtained that, alongside with the works done previously by other institutions, has led to a detailed image of the system of groundwaters in the Central Valley, whose main elements are summarized as follows:

The Central Valley of Cochabamba is an intramountain depression placed in the Eastern Cordillera. Its base is situated at approximately 2.500 m above sea level and it is surrounded by the Cordilleran mountain range, that in the northern part surpasses 5.000 m of altitude.

It can be assumed that the formation of the valley started in the Upper Tertiary. However, up to now no sediments of that age have been found deposited in the Central Valley, but only in the Valley of Sacaba, that seem to have a comparable history.

The deposits in the valley originate from the surround-

circundante, han sido desprendidos por procesos de erosión, transportados en los ríos que confluyen hacia el valle y posteriormente depositados en forma de sedimentos fluviales de grano grueso en áreas próximas a los faldeos de la cordillera, de granulometría más fina hacia el centro del valle o en un ambiente lacustre dentro de un lago ubicado en la parte inferior del valle. La extensión de los sedimentos lacustres en el valle central oscilaba de acuerdo a la extensión del lago. Aquella estaba controlada no solamente por factores climáticos sino también muy probablemente por procesos tectónicos: Es de suponer que hasta el Plioceno superior existía un lago de gran extensión que, posteriormente, por el hundimiento de un dorsal ubicado al noroeste de Vinto, sufrió un desagüe.

A consecuencia de la alternación de la extensión del lago, en gran parte del valle se iban depositando sedimentos lacustres sobre fluviales y vice versa. Hoy en día, los sedimentos depositados presentan secuencias interdigitadas de unidades lacustres y fluviales, formando un gran sistema de acuíferos. De acuerdo a los resultados de investigaciones geofísicas, el espesor de las capas sedimentarias en el valle en la zona septentrional puede exceder los 1.000 m.

Mientras la precipitación anual en el valle se ubica entre 400 y 500 mm, en las alturas de la cordillera suele ser significativamente mayor y llegar hasta 1.300 mm. Parte de esta agua desciende de la cordillera en los ríos que desembocan en los mencionados abanicos fluviales. Por su granulometría gruesa, una parte importante de los escurrimientos superficiales y de las precipitaciones se infiltra en el área de los abanicos.

De ésta zona de recarga, el agua subterránea toma curso hacia la zona baja del valle, en la que se encuentra el cauce principal, el Río Rocha.

Estudios geoelectrónicos efectuados mediante CABAS arrojaron luz sobre la distribución de sedimentos con diferentes características granulométricas e hidráulicas. En términos generales, las partes ubicadas en el norte del valle son conformadas mayormente por depósitos de grano grueso, llegando a contener bloques de varios metros de diámetro. Con la distancia de los faldeos de la cordillera hacia el sur disminuye el gradiente de los escurrimientos superficiales y en consecuencia el grosor de los granos de los depósitos. Los depósitos lacustres en el centro del valle disponen de grandes fracciones de limo y arcilla.

Las características granulométricas del sistema de acuíferos están estrechamente relacionadas a sus propiedades hidráulicas. Las áreas exteriores del valle

ing Cordilleran range, have been removed by processes of erosion, transported within the rivers that converge towards the valley and later deposited as coarse grained fluvial sediments in areas next to the slopes of the range, of finer granulometry towards the center of the valley or in an lacustrine environment in a lake located in the lower part of the valley. The extension of the lacustrine sediments in the central valley oscillated according to the extension of the lake. That was controlled not only by climatic factors but also probably by tectonic processes: It is supposed that up to the Upper Pliocene existed a lake of large extension that, later, due to the collapse of a ridge placed in the northwest of Vinto, suffered a drain.

As a result of the alternating extension of the lake, in most of the valley lacustrine sediments were deposited on fluvial ones and vice versa. Nowadays, the deposited sediments present interfingering sequences of lacustrine and fluvial units, forming a big system of aquifers. According to the results of geophysical research, the thickness of the sedimentary strata in the northern zone of the valley can exceed 1.000 m.

While the annual precipitation in the valley lies between 400 and 500 mm, in the elevations of the Cordilleran range it is usually significantly higher and usually reaches up to 1.300 mm. Part of this water flows off from the range through the rivers that mound into the mentioned fluvial fans. For their coarse granulometry, an important part of the surface waters and of the rainfalls infiltrates in the area of the fans.

From this area of recharge, the groundwater takes course towards the low area of the valley, in which the main river bed, the River Rocha is located.

Geoelectric studies carried out by CABAS threw light on the distribution of sediments with different granulometric and hydraulic characteristics. In general terms, the parts placed in the north of the valley are mainly formed by coarse grained deposits, containing blocks of several meters of diameter with intercalation of mud and sand. Towards the south the grain size of the deposits decreases. The deposits in the center of the valley are mainly lacustrine and have great fractions of mud and clay.

The granulometric characteristics of the strata are closely related to the hydraulic properties of their aquifers. The exterior areas of the valley, whose strata con-

disponen de una alta permeabilidad, la cual disminuye hacia el centro.

Las mayores transmisividades hidráulicas se encuentran en una franja en el área septentrional desde el río Payrumani, pasando por El Paso y Tiquipaya hasta la salida del valle en su extremo oriental. La transmisividad disminuye paulatinamente hacia el sur y alcanza su mínimo al sur de Sipe Sipe en el extremo occidental y en el área del aeropuerto en la parte oriental.

La parte central y sur del valle está cubierta por una capa arcillosa lo que lleva a un acuífero de características confinadas con pozos y vertientes surgientes. Gran parte de las vertientes naturales en las proximidades del Río Rocha han disminuido su caudal o dejado de existir en las últimas décadas. La disminución del caudal de las fuentes naturales de agua está relacionada a la explotación de las aguas subterráneas.

La explotación de las aguas subterráneas en el valle ocurre mediante pozos distribuidos sobre todo el área. Los pozos ubicados en la franja septentrional suelen tener los mejores rendimientos en términos de cantidad.

La calidad de las aguas subterráneas varía en el área del valle pero por lo general cumple con los requisitos de la aptitud para consumo humano. Se constatan diferencias de calidad entre aguas subterráneas de la zona septentrional / central / occidental, la zona en el sureste del valle y aquella en el suroeste.

Las aguas de la zona septentrional / central / occidental tienen baja mineralización, lo que puede atribuirse a las altas velocidades de flujo y la poca edad de las aguas (por ser zona de recarga de alta permeabilidad). Sus características hidroquímicas varían pero por lo general muestran características bicarbonatadas-calcio-magnésicas.

Las aguas en la zona sur-oriental tienen una facies bicarbonatada sódica. En parte muestra conductividades altas, lo que no se considera representativo por haberse detectado en pozos excavados. El agua, tanto como en la zona norte por lo general es potable.

Por último, en la zona sur-occidental las aguas oscilan entre características sulfatada-magnésico-cálcicas y bicarbonatada-sulfatada-calcio-magnésicas. Las conductividades resp. las cargas iónicas son claramente más elevadas que en la zona norte y en un punto de análisis sobrepasa los 1700 S/cm.

El sistema de aguas subterráneas en el Valle Central presenta un rico reservorio de agua dulce, que hasta el presente constituye la fuente de agua más importante

consist of mainly coarse grains, have a high transmissivity.

The highest hydraulic transmissivity is found in a strip in the northern zone from the Payrumani River, passing El Paso and Tiquipaya towards the entry of the valley at its eastern end. It decreases gradually towards the south and reaches its minimum in the south of Sipe Sipe in the southwestern end and in the area of the airport in the eastern part.

The central and southern part of the valley is covered by a clayey layer that contains an aquifer of confined characteristics with wells and springs. Many of the natural springs in the proximity of the Rocha River have decreased their flow or dried out in the last decades. The decrease of the flow rates is related to the increase of the exploitation of the groundwaters.

The exploitation of the groundwaters in the valley occurs through wells distributed all over the area. The wells placed in the northern strip usually have the best yields in terms of quantity.

The quality of the groundwaters varies in the area of the valley but normally complies with the requirements of aptitude for human consumption. Differences can be observed as to the quality between the groundwaters of the northern / central / western zone, the area in the southeast of the valley and that in the southwest.

The waters of the northern / central zone have low mineralization, which can be attributed to the high flow velocities and the little age of the waters (because its a zone of recharge and of high permeability). Their hydrochemical characteristics vary, but usually they show bicarbonated calcio-magnesium characteristics.

The waters in the south-eastern zone have a bicarbonated sodium facies. Partially it shows high conductivity. The representativity of the samples, however, can be questioned because they originate from excavated wells. The water in the northern area is usually potable.

In the south-western zone the waters oscillate between sulphated-magnesia-calcic and bicarbonated-sulphated-calcium-magnesia characteristics. The conductivities and the ionic loads are clearly higher than in the northern zone.

The groundwater system in the Central Valley presents a rich reservoir of fresh water, which still constitutes the most important water source for human consump-

para consumo humano y para riego. Por presentar las mejores propiedades hidráulicas e hidroquímicas, la zona norte del valle se ha establecido como zona preferencial de explotación.

Hasta el día de hoy, el acuífero se ha aprovechado sin que muestre síntomas de deterioro a gran escala. Sin embargo es de suponer, que con el esperado crecimiento poblacional, la demanda aumentará sobre el rendimiento del recurso de aguas subterráneas. Para evitar el deterioro por daños que difícilmente son remediables, resulta recomendable aprovechar los recursos de forma ordenada mediante un plan de explotación.

En este sentido y para concluir este texto, vale reiterar la necesidad de un marco regulatorio y una entidad que fiscalice los reglamentos para llegar a un aprovechamiento sostenible de los recursos de aguas subterráneas.

tion and for irrigation. The northern area of the valley presents the best hydraulic and hydrochemical properties and has been established as a preferential pumping area.

Until today, the aquifer has been used without showing symptoms of deterioration at a large scale. However, it has to be supposed that with the expected population growth, the demand will increase above the yield of the groundwater resource. To avoid the deterioration by damages that can hardly be remediated, it is recommendable to make use of the resources in a regulated way using an operating plan.

In this sense and in order to conclude this text, it is important to mention again the need for a regulatory framework and an entity that controls the norms to reach a sustainable exploitation of the groundwater resources.

ANEXO: TABLA DE ANÁLISIS EFECTUADOS POR EL PROYECTO CABAS / ANNEX: TABLE OF ANALYSES CARRIED OUT BY THE CABAS PROJECT

(véase cap. 7.1 /see ch. 7.1)

Número y código SERGEOMIN del punto de muestreo	Coordenadas UTM		Filtros	Fecha	pH	T (° C)	Cond. (µS/cm)	Total (mg/l)	Colif. (x/100ml)	Cationes												Aniones										Σ	e				
	E	N								(m - m)	Na ⁺		K ⁺		Ca ²⁺		Mg ²⁺		Fe ²⁺		Mn ²⁺		Σ	HCO ₃ ⁻		Cl ⁻		SO ₄ ²⁻		NO ₃ ⁻				NO ₂ ⁻		HPO ₄ ²⁻	
			mg/l	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l		meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l		meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l							
1	CB 0009	780200	8072400	32 - 45	09.03.93	7,2	19,6	596	466,7	-	22,9	1,00	1,8	0,05	72,9	3,64	29,3	2,41	0,32	0,01	-	-	7,10	204,0	3,34	5,3	0,15	123,8	2,58	6,4	0,10	-	-	-	-	6,17	7,0
2	CB 0093	786050	8078500	23 - 53	09.03.93	6,6	20,0	103	79,4	-	4,4	0,19	0,6	0,02	12,9	0,64	3,1	0,25	0,39	0,01	-	-	1,12	46,0	0,75	5,3	0,15	5,6	0,12	1,1	0,02	-	-	-	-	1,04	3,8
3	CB 0127	779300	8069280	-72	29.03.95	7,0	20,6	1757	1404,5	0	100,6	4,38	5,2	0,13	156,3	7,80	105,3	8,66	0,17	0,01	0,10	0,00	20,98	373,5	6,12	40,5	1,14	622,3	12,96	0,0	0,00	0,00	0,00	0,5	0,01	###	1,8
4	CB 0130	780440	8072825	-85	03.07.95	7,3	19,1	702	493,3	0	21,3	0,93	2,4	0,06	75,8	3,78	34,2	2,82	0,21	0,01	0,00	0,00	7,59	207,5	3,40	6,6	0,19	138,4	2,88	6,6	0,11	0,00	0,00	0,3	0,01	6,58	7,1
5	CB 0132	779900	8073800	-71	12.03.93	7,6	20,0	430	320,9	-	6,0	0,26	0,9	0,02	58,7	2,93	20,5	1,68	0,00	0,00	-	-	4,89	195,3	3,20	4,3	0,12	32,7	0,68	2,6	0,04	-	-	-	-	4,04	9,5
6	CB 0134	781000	8074375	-120	03.07.95	7,6	22,1	288	205,3	8	10,4	0,45	1,2	0,03	35,6	1,78	9,8	0,80	0,21	0,01	0,00	0,00	3,07	114,0	1,87	1,8	0,05	29,7	0,62	2,2	0,03	0,00	0,00	0,5	0,01	2,58	8,7
7	CB 0138	782900	8075100	32 - 55	03.07.95	6,8	20,0	358	249,0	0	14,2	0,62	1,6	0,04	28,3	1,41	20,1	1,65	0,22	0,01	0,00	0,00	3,73	133,6	2,19	11,7	0,33	29,0	0,60	10,1	0,16	0,00	0,00	0,3	0,01	3,29	6,3
8	CB 0139	782300	8074600	36 - 65	30.03.95	7,1	20,6	223	160,5	5	8,2	0,36	1,3	0,03	18,0	0,90	13,1	1,08	0,35	0,01	0,00	0,00	2,38	84,6	1,39	5,8	0,16	13,9	0,29	14,7	0,24	0,00	0,00	0,5	0,01	2,09	6,5
9	CB 0144	784700	8077500	-75	11.03.93	6,6	20,0	145	92,4	-	8,3	0,36	1,5	0,04	11,0	0,55	5,5	0,45	0,15	0,01	-	-	1,40	47,7	0,78	8,2	0,23	7,5	0,16	2,5	0,04	-	-	-	-	1,21	7,4
10	CB 0145	785050	8076600	17 - 55	03.07.95	7,3	-	248	156,3	25	11,0	0,48	2,3	0,06	19,4	0,97	10,3	0,84	0,16	0,01	0,00	0,00	2,36	69,5	1,14	12,2	0,34	17,8	0,37	13,2	0,21	0,04	0,00	0,4	0,01	2,08	6,4
11	CB 0153	786840	8078600	29 - 63	29.03.95	7,1	19,9	304	227,9	0	1,2	0,05	1,6	0,04	35,3	1,76	12,3	1,02	2,32	0,08	0,00	0,00	2,95	156,4	2,56	2,0	0,06	13,3	0,28	3,1	0,05	0,00	0,00	0,4	0,01	2,96	0,1
12	CB 0168	787840	8079200	23 - 70	15.03.93	7,5	19,3	174	134,5	-	7,8	0,34	0,7	0,02	18,0	0,90	7,6	0,63	0,20	0,01	-	-	1,89	91,1	1,49	2,8	0,08	5,0	0,10	1,2	0,02	-	-	-	-	1,70	5,4
13	CB 0178	787950	8078050	-30	11.03.93	7,6	18,5	265	201,5	-	9,2	0,40	0,7	0,02	27,4	1,37	13,3	1,10	0,21	0,01	-	-	2,89	138,9	2,28	2,8	0,08	7,2	0,15	1,7	0,03	-	-	-	-	2,53	6,5
14	CB 0192	788900	8078200	24 - 54	29.03.95	7,6	17,4	412	301,1	570	1,9	0,08	2,4	0,06	55,3	2,76	15,5	1,27	0,14	0,01	0,00	0,00	4,18	193,2	3,17	5,1	0,14	22,5	0,47	4,7	0,08	0,00	0,00	0,5	0,01	3,86	3,9

Número y código SERGEOMIN del punto de muestreo	Coordenadas UTM		Filtros	Fecha	pH	T	Cond.	Total	Colif.	Cationes												Aniones												e			
										Na+		K+		Ca2+		Mg2+		Fe2+		Mn2+		HCO3 ⁻		Cl ⁻		SO4 ²⁻		NO3 ⁻		NO2 ⁻		HPO4 ²⁻					
										mg/l	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l		mg/l	meq/l	
15	CB 0199	789800	8078800	42 - 57	11.03.93	7,9	19,0	186	129,6	-	5,4	0,24	0,5	0,01	19,0	0,95	8,1	0,67	0,04	0,00	-	-	1,86	76,4	1,25	2,1	0,06	15,8	0,33	2,2	0,04	-	-	-	-	1,68	5,2
16	CB 0211	791550	8079500	16 - 60	04.07.95	7,4	20,8	285	201,4	8	13,4	0,58	0,5	0,01	26,3	1,31	12,5	1,03	0,08	0,00	0,00	0,00	2,94	114,0	1,87	6,6	0,19	25,7	0,54	2,3	0,04	0,02	0,00	0,0	0,00	2,63	5,6
17	CB 0256	794120	8082050	17 - 53	09.03.93	7,1	19,1	436	308,1	-	11,4	0,50	1,4	0,04	37,2	1,85	26,0	2,13	0,34	0,01	-	-	4,53	208,3	3,41	1,8	0,05	17,7	0,37	4,1	0,07	-	-	-	-	3,90	7,5
18	CB 0287	793100	8082800	-70	15.03.93	7,2	19,0	134	176,6	-	11,4	0,50	1,3	0,03	17,6	0,88	13,8	1,14	0,08	0,00	-	-	2,54	119,4	1,96	4,3	0,12	6,9	0,14	2,0	0,03	-	-	-	-	2,25	6,1
19	CB 0635	801400	8069550	18 - 57	04.04.95	7,9	-	548	408,9	49	69,8	3,04	4,5	0,11	17,6	0,88	12,1	1,00	2,19	0,08	0,87	0,03	5,14	277,8	4,55	16,2	0,46	6,6	0,14	0,3	0,00	0,02	0,00	0,9	0,02	5,17	0,4
20	CB 0682	800650	8074250	29 - 45	18.02.93	7,6	19,9	566	446,0	-	63,0	2,74	3,8	0,10	25,0	1,25	16,2	1,33	4,26	0,15	-	-	5,57	308,1	5,05	21,3	0,60	3,3	0,07	1,0	0,02	-	-	-	-	5,74	1,5
21	CB 0796	791100	8083100		04.04.95	7,4	19,0	224	158,4	0	8,0	0,35	1,0	0,03	21,6	1,08	9,0	0,74	1,91	0,07	0,18	0,01	2,27	99,4	1,63	3,8	0,11	11,2	0,23	2,1	0,03	0,00	0,00	0,2	0,00	2,01	6,1
22	CB 0797	797200	8073200		04.04.95	7,7	20,6	477	371,4	110	56,7	2,47	2,8	0,07	22,4	1,12	17,4	1,43	2,07	0,07	0,47	0,02	5,18	255,8	4,19	4,1	0,11	6,6	0,14	0,0	0,00	0,00	0,00	3,1	0,06	4,51	6,9
23	CB 0798	798800	8077600		05.07.95	7,3	19,1	198	135,3	0	13,9	0,60	0,4	0,01	16,2	0,81	6,6	0,54	0,49	0,02	0,00	0,00	1,98	79,8	1,31	13,7	0,39	2,0	0,04	2,1	0,03	0,03	0,00	0,1	0,00	1,77	5,6
24	CB 0799	787550	8079350	53 - 109	04.07.95	6,7	-	183	132,8	6	8,5	0,37	0,3	0,01	18,6	0,93	7,6	0,62	0,11	0,00	0,00	0,00	1,93	84,4	1,38	2,5	0,07	8,6	0,18	1,8	0,03	0,04	0,00	0,4	0,01	1,67	7,3
25		802900	8076000	36 - 69	06.07.95	8,7	19,7	537	377,1	192	48,1	2,09	1,8	0,05	38,1	1,90	19,1	1,57	3,71	0,13	0,22	0,01	5,75	177,8	2,91	33,9	0,96	54,1	1,13	0,0	0,00	0,00	0,00	0,3	0,01	5,00	6,9
26		803000	8077250	27 - 66	06.07.95	7,0	19,0	268	188,2	3	18,3	0,80	0,5	0,01	20,6	1,03	11,0	0,90	0,41	0,01	0,93	0,03	2,79	98,0	1,61	20,3	0,57	17,8	0,37	0,0	0,00	0,03	0,00	0,3	0,01	2,56	4,4
27	CB 879	803150	8075050		04.05.95	7,6	19,0	643	325,3	0	51,1	2,22	2,6	0,07	18,8	0,94	9,9	0,82	2,77	0,10	0,50	0,02	4,16	225,4	3,69	2,1	0,06	8,6	0,18	0,0	0,00	0,00	0,00	3,4	0,07	4,00	2,0
28		805250	8068200		06.07.95	6,0	23,6	2010	1225,9	0	260,5	11,33	10,3	0,26	50,5	2,52	61,1	5,03	2,19	0,08	0,33	0,01	19,23	134,5	2,20	235,1	6,63	468,0	9,74	3,3	0,05	0,04	0,00	0,1	0,00	18,63	1,6
29	CB 869	783100	8069620	-60	03.07.95	7,3	20,6	1395	1052,6	61	33,3	1,45	6,4	0,16	95,1	4,75	121,0	9,95	0,23	0,01	0,00	0,00	16,32	319,2	5,23	8,6	0,24	468,0	9,74	0,6	0,01	0,00	0,00	0,1	0,00	15,23	3,5
30	CB 870	783100	8072300	-100	01.04.95	7,5	19,9	659	392,7	1900	11,8	0,51	1,5	0,04	40,9	2,04	29,0	2,39	3,30	0,12	0,00	0,00	5,10	228,2	3,74	5,8	0,16	67,7	1,41	4,6	0,07	0,00	0,00	0,0	0,00	5,39	2,7
31	CB 874	793700	8077000	-50	11.03.93	7,8	19,2	220	211,6	-	14,8	0,64	0,7	0,02	18,4	0,92	10,5	0,86	0,13	0,00	-	-	2,44	156,2	2,56	2,8	0,08	6,0	0,12	2,1	0,03	-	-	-	-	2,80	6,7
32	CB 875	797550	8076900	-54	05.07.95	7,9	-	285	209,5	0	24,1	1,05	0,4	0,01	27,9	1,39	6,8	0,56	1,04	0,04	0,23	0,01	3,06	120,8	1,98	10,6	0,30	16,5	0,34	0,7	0,01	0,05	0,00	0,2	0,00	2,64	7,4
33	CB 877	795400	8076250		03.04.95	7,7	21,1	221	167,6	6	18,6	0,81	1,0	0,03	17,6	0,88	8,2	0,68	0,32	0,01	0,43	0,02	2,42	110,4	1,81	2,3	0,06	7,3	0,15	0,0	0,00	0,00	0,00	1,4	0,03	2,05	8,1

REFERENCIAS / REFERENCES

Bibliografía / Bibliography

- AHLFELD, F. (1970): Zur Tektonik des andinen Bolivien. Geol. Rdsch., 59 (3), pp. 1124-1140, Stuttgart
- AHLFELD, F. (1972): Geología de Bolivia. 190 pp., Ed. Los Amigos del Libro, La Paz – Cochabamba
- AHLFELD, F. (1973): Geografía Física de Bolivia. Enciclopedia Boliviana, 16, Ed. Los Amigos del Libro, La Paz – Cochabamba
- ARGOLLO, J., FOURNIER, M., SERVANT, M. (1987): Dépôts fluviatiles en Bolivie, variations du regime des ecoulements au cours du Quaternaire recent. - Seminario 'Paleolacs-Paleoclimats', ORSTOM, Bondy, 29-30.1.1987, p.19-23
- ARGOLLO, J., GOUZE, P., SALIEGE, J.F., SERVANT, M. (1987): Fluctuations des glaciers de Bolivie au Quaternaire recent. - Seminario 'Paleolacs-Paleoclimats', ORSTOM, Bondy, 29.30.1.1987, p. 15-17
- BALLIVIAN, O., BLES, J.L., SERVANT, M. (1978): El Plio-Cuaternario de la región de La Paz (Andes orientales, Bolivia). Cah. O.R.S.T.O.M., sér. géol., 10 (1): 101-114
- BALLON-AYLLON, R., RÖSSLING, R., AVILA-SALINAS, W. (1997): Geología de la Hoja Cochabamba 1:250.000, en: Troëng, B. and Riera-Kilibarda, C, eds.: Mapas temáticos de recursos minerales de Bolivia, Hoja Cochabamba, Memoria Explicativa, Boletín del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERGEOMIN), Nº12, p. 27-50.
- BARTH, W. (1972): Die geowissenschaftliche Literatur Boliviens in den Jahren 1960 – 1971: Ein Überblick. Zbl. Geol. Paleontol., 1(1/2): pp. 100-130, Stuttgart
- BOYLE ENGINEERING: (1973): Investigaciones adicionales de aguas subterráneas para la ciudad de Cochabamba, segundo campo de pozos
- BRGM – SEURECA (1990): Evaluación de los recursos de agua y abastecimiento de agua potable de la ciudad de Cochabamba, Bolivia – Programa del Banco Mundial PPF-444-Bo
- CLAPPERTON, C.M., (1979): Glaciation in Bolivia before 3.27 Myr. Nature, 277: pp. 375-376
- CLINTON BOGERT ASSOCIATES INTERNATIONAL (1976). Revisión de las condiciones hidrogeológicas del campo de pozos de Coña Coña, Cochabamba – Bolivia
- CONSULTORA NACIONAL (CONNAL S.R.L.) (1990): Evaluación de los recursos hídricos subterráneos de la subcuenca de Quillacollo
- CONSULTORES GALINDO LTDA, PROYECTO QUILLACOLLO (1994): Fuentes de aprovisionamiento de agua potable. Situación actual del campo de pozos diseñado por CONNAL S.R.L.
- COLQUE, G. (1998): Mapa hidrogeológico del Vale Central de Cochabamba, Esc. 1:75.000. Tesis de grado, Univ. Técnica de Oruro
- CPM – CONANDINA (1993): Estudio hidrogeológico de la zona de Vinto, para la determinación de fuentes de aprovisionamiento de agua potable
- DELGADILLO, E., PINTO, A. (1970): Prospección geofísica de resistividad para aguas subterráneas del Valle de Cochabamba. - La Paz, 23 pp.

- DOBROVOLNY, E. (1962): Geología del Valle de La Paz. Ministerio de Minas y Petróleo, Departamento Nacional de Geología, Boletín N°3
- DRESCH, J. (1958): Problèmes morphologiques des Andes Centrales. *Annales de Géogr.*, 360: pp. 130-151
- ELLERT, N, SANCHEZ, C., RICALDI, V., ANAYA, L. (1992): Levantamiento geofísico del abanico de El Paso. Compendio de ponencias del Primer Congreso Hidrogeológico Latinoamericano, Mérida, Venezuela.
- FAO-UNESCO (1988): Soil map of the world. - Revised Legend, 119 pp., Roma
- FINSTERWALDER, R., JORDAN, E. (1989): Begleitworte zur Karte Cordillera Real Nord (Illampu) 1:50000 – Ein Beitrag zur kartographischen darstellung sowie Glaziologie und Gletschergeschichte der bolivianischen Anden. *Erdkunde*, 43: pp. 36-50
- FURRER, G., GRAF, K. (1978): Die subnivale Höhenstufe am Kilimandjaro und in den Anden Boliviens und Ecuadors. *Erdwiss. Forschung*, 11: pp. 441-457
- GOUZE, M.P. (1987): La cordillère orientale de Bolivie: glaciations Plio-Pleistocenes, essai de paleohydrologie (30.000 ans B.P. – actuel) d’après les oscillations des glaciers et la composition isotopique des macrorestes vegetaux. Tesis de grado, Université de Paris, Centre d’Orsay, 173 pp.
- GOUZE, M.P., ARGOLLO, J., SALIEGE, J.-F., SERVANT, M. (1996): Interpretación paléoclimática des oscillations des glaciers au cours des 20 derniers millénaires dans les régions tropicales: exemple des Andes boliviennes. *C.R. Acad. Sc. Paris, Série II (3)*: pp. 219-223
- GOUZES, R., DELPONT, G. (1990): Evaluación de los recursos de agua y abastecimiento en agua potable de la ciudad de Cochabamba, Bolivia. - BRGM/SEURECA
- GRAF, K. (1981): Palynological investigations of two post-glacial peat-bogs near the boundary of Bolivia and Peru. - *Journal of Biogeography*, 6
- GRAF, K. (1983): A quaternary pollen-profile from the upper valley of Cochabamba (Bolivia). In: EVENSON et al. (publ.): *Tills and related deposits*, Rotterdam, pp. 365-372
- GROSJEAN, M., MESSERLI, B., SCHREIER, H. (1991): Seehochstände, Bodenbildung und Vergletscherung im Altiplano Nordchiles: Ein interdisziplinärer beitrug zur Klimageschichte der Atacama. *Erste Resultate*. *Bamberger geogr. Schriften*, 11, pp. 99-108
- HASTENRATH, S., KUTZENBACH, J. (1985): Late Pleistocene climate and water budget of the South American Altiplano. *Quat. Res.*, 24, pp. 249-256
- HOECK, H., STEINMANN, G. (1906): Erläuterungen zur Routenkarte der Expedition Steinmann, Hoeck v. Bistram in den Anden von Bolivien 1903/04. *Peterm. Geogr. Mitt.*, 52, pp. 1-13 y 25-32
- INGENIERIA GLOBAL, DEUTSCHE PROJECT UNION (1965): Recomendaciones para una captación de agua subterránea para pozos de tubos en la región de Vinto para el abastecimiento de agua potable de la ciudad de Cochabamba, Bolivia
- JORDAN, J. (1967): Estudio geológico de la región de Cochabamba, Tesis de grado, UMSA, La Paz
- JORDAN, L. (1992): Sobreexplotación y procesos de contaminación en la cuenca de Cochabamba. en: *Recursos hídricos en Bolivia y su dimensión ambiental*, AGID Geoscien. Ser. 20
- KENNAN, L., LAMB, S., RUNDLE, C. (1995): K-Ar dates from the Altiplano and the Cordillera Oriental of Bolivia: Implications for Cenozoic stratigraphy and tectonics. *Journal of South American Earth Sciences*, Vol. 8 (2), p. 163-186.
- LAUER, W., RAFIQPOOR, M.D. (1986): Die jungpleistzäne Vergletscherung der Apolobamba-Kordillere (Bolivien). *Erdkunde*, 40, pp. 125-145
- LAUER, W., RAFIQPOOR, M.D. (1989): Zum Stand der Pleistzänforschung in der nordöstlichen Kordillere von Bolivien. *Erdkunde*, 43, pp. 228-231

- MANSILLA L., W. (1979): Geología del Plio-Cuaternario de la cuenca de Sacaba Cochabamba. - Tesis de Grado, UMSA, La Paz, 54 pp.
- MERCADO CONSULTANTS, HYDROGEOLOGY & ENVIROMENTAL QUALITY, RISHON - LEZION, ISRAEL (1996): Consultores Doctores Abraham Mercado & Haim Michelson, Evaluación preliminar de recursos de agua subterránea en el valle Alto y de estimaciones previas del potencial de agua subterránea en el valle de Cochabamba
- MÜLLER, R. (1985): Zur Gletschergeschichte in der Cordillera Quimiza Cruz, Bolivien. Tesis de grado, Zürich, Suiza
- MUÑOZ REYES, J. (1980): Geografía de Bolivia. La Paz, 478 pp.
- NOGAMI, M. (1976): Altitude of the modern snowline and the pleistocene snowline in the Andes. Geog. Reports of Tokyo Metropolitan Univ., 11, pp. 71-86
- PROYECTO INTEGRADO DE RECURSOS HÍDRICOS EN COCHABAMBA (PIRHC) (GEOBOL-NNUU) (1987): Investigaciones de aguas subterráneas en las cuencas de Cochabamba, Informe técnico
- PURPER, I., PINTO, I.D. (1980): Interglacial ostracodes from Wasa-Mayu, Bolivia. Pesquisas, 13, pp. 161-184, Porto Alegre
- SCHABITZ, F., STINGL, H., VEIT, H.: Jungquartäre Landschaftsentwicklung und Klimageschichte beiderseits der Ariden Diagonale Südamerikas. - Bamberger Geogr. Schriften, 11: 369-373
- SELZER, G.O. (1990): Recent glacial history and paleoclimate of the Peruvian-Bolivian Andes. Quat. Science Rev., 9, pp. 137-152
- SERVANT, M. (1977): El cuadro estratigráfico del Plio-Cuaternario del Altiplano de los Andes tropicales de Bolivia. Rev. De Geoc., 9, pp. 23-29, UMSA, La Paz,
- SERVANT, M., FONTES, J.C. (1978): Les lacs quaternaires des hauts plateaux des Andes boliviennes. Premières interprétations paléoclimatiques. Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Géol., 10(1):9-24
- SERVANT, M et al. (1981): variation du régime et de la nature des précipitations au cours des 15 derniers millénaires dans les Andes de Bolivie. C. R. Acad. Sc. Paris, 292(II): pp. 1209-1212
- SEURECA-BRGM-SOGREAH-CGL (1994): Plan maestro para el abastecimiento de agua a la ciudad de Cochabamba y diseños finales de obras de rehabilitación y ampliación
- SHEFFELS, B. (1988): Structural constraints on crustal shortening in the Bolivian Andes. Unpublished Ph. D. Thesis. Massachusetts Institute of Technology, 167 pp.
- SOLIZ, G., ARAGUÁS, L. (1995): Estudio de las aguas subterráneas del Valle de Cochabamba (Bolivia) mediante técnicas isotópicas. En: Estudios de hidrología isotópica en América Latina 1994 – resultados obtenidos en el marco del proyecto RLA/(014 – ARCAL XIII: Aplicación de técnicas isotópicas en hidrología, OIEA, Viena, Austria, 1995.
- STIMSON, J.; FRAPPE, S.; DRIMMIE, R.; RUDOLPH, D. & FARVOLDEN, R. (1992): Evolución isotópica y geoquímica de las aguas subterráneas en el valle de Cochabamba, Bolivia. En: “Los recursos hídricos en Bolivia y su dimensión ambiental”, pp. 197-210, Ed. Ricaldi, V.; Flores, C. y Anaya, L.
- STIMSON, J.; RUDOLPH, D.; FARVOLDEN, R.; FRAPPE, S. & DRIMMIE, R. (1993): Causes of groundwater salinization in a low lying area of Cochabamba Valley, Bolivia. En: “Isotope Techniques in the study of past and current environmental changes in the hydrosphere and atmosphere”, pp. 185-198, OIEA, Viena.
- STRAHL, J.: Estudio palinológico del pozo de perforación Cb 297 en el Valle Central de Cochabamba, Bolivia. Boletín del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERGEOMIN) No. 14, 1998.
- STRUCKMEIER, W., MARGAT, J. (1995): Hydrogeological Maps. A Guide and Standard Legend. – IAH, International Contributions to Hydrogeology, Vol. 17; Hannover, Alemania.
- TROLL, C. (1929): Reisen in den östlichen Anden Boliviens. Pet. Geogr. Mitt., 75, pp. 181-188

- TROLL, C. (1937): Quartäre tektonik und Quartärklima der tropischen Anden. Frankf. Geogr. Hefte, 11(1): pp. 64-67
- TROLL, C., FINSTERWALDER, R. (1935): Die Karten der Cordillera Real und des Talkessels von La Paz (Bolivien). Pet. Geogr. Mitt., 81, pp. 393-399 y 445-455
- URQUIDI, G. (1954): Monografía del Departamento de Cochabamba, Publicación de la H. Municipalidad de Cochabamba
- VEIT, H. (1990): Investigaciones geomorfológicas y pedológicas sobre el Cuaternario Superior en la Cordillera del Valle de Elqui (Chile, 30°S). XII. Congreso nacional de geografía y III. Jornadas cartografía temática, La Serena, 15.-18.11.1990, resumen de ponencia, pp. 104-106
- VEIT, H. (1991): Jungquartäre Relief- und Bodenentwicklung in der Hochkordillere im Einzugsgebiet des Río Elqui (Nordchile, 30°S), Bamberger Geogr. Schriften 11, S. 81-97
- VEIT, H., STINGL, H. (1991): Landschafts- und Klimageschichte der ariden Diagonale im Bereich von 27 - 33°S unter besonderer Berücksichtigung geomorphologischer und bodenkundlicher Befunde. In: GARLEFF, K, F. SCHABITZ, H. STINGL & H. VEIT: Jungquartäre Landschaftsentwicklung und Klimageschichte beiderseits der ariden Diagonale Südamerikas. Bamberger Geogr. Schriften, 11, pp. 369-373
- VILLAROEL, C., GRAF, K. (1979): Zur Entstehung des Talkessels von La Paz/Bolivien und Umgebung. Geogr. Helv., 1, pp. 43-49
- WIRRMANN, D., DE OLIVEIRA ALMEIDA, L.F. (1987): Low Holocene level (7.700 – 3.650 years ago) of Lake Titikaka (Bolivia, South America). Paleogeogr., Paleoclimat., Paleoecol., 59, pp. 315-323
- YBERT, J.P. (1981-1982): Analyse palynologique de la coupe holocène du Río Chirijahuira sur l'Altiplano bolivien. Cah. ORSTOM, ser. Geol., XII(2), pp. 125-133

Informes técnicos del Proyecto CABAS / *Technical reports of the CABAS Project*

- CORTEZ, L., SAAVEDRA, E.: Instalación de estaciones pluviométricos en el Valle de Cochabamba, IT CABAS N°7, Febr. 1993
- CORTEZ, L.: Anuario de información meteorológica para el año 1992, IT CABAS N°9, Feb. 1993
- CORTEZ, L.: Resultados preliminares de la investigación hidrogeológica del Nor-Oeste del Valle Central de Cochabamba, IT CABAS N°10, Dic. 1992
- DIAZ, J., RAMIREZ, I., ZAEPKE, M.: Hidrogeoquímica del Valle Central de Cochabamba, IT CABAS N°33, Nov. 1995
- DIAZ, J., TORREZ, J.: Anuario de información meteorológica 1995 para la cuenca de Cochabamba, IT CABAS N°36, Dic. 1997
- DIAZ, J., SAAVEDRA, E.: Anuario de información meteorológica 1993 para la cuenca de Cochabamba, IT CABAS N°17, Marzo 1994
- DIAZ, J.: Red de observación en el Valle Central de Cochabamba; Fluctuación de los niveles estáticos 1992 – 1997, IT CABAS N°55, Ago. 1998
- DIAZ, J., ZENTENO, J.: Anuario de información meteorológica 1995 del Chaco Tarijeño, IT CABAS N°37
- ESPINOZA, A., LOPEZ, S., SCHILDKNECHT, F.: Estudio geoeléctrico área Santa Vera Cruz, IT CABAS N°39, Sep. 1996
- FERNANDEZ, A., NEUMANN-REDLIN, CH.: El sector de aguas subterráneas en Bolivia: Análisis de la organización institucional y sugerencias para su mejoramiento, IT CABAS N°21, Julio 1994
- FIELITZ, K., GARABITO, E., INSINGER, J.F.: Estudio geoeléctrico para la exploración de aguas subterráneas en el Valle Central de Cochabamba y en el Chaco Tarijeño, IT CABAS N°8, Dic. 1992
- FIELITZ, K., SORUCO, W., INSINGER, J.F.: Sondeos eléctricos para la exploración de aguas subterráneas en las Pampas de Lequezana (Potosí), IT CABAS N°23, Dic. 1994
- FIELITZ, K., SORUCO, W., INSINGER, J.F.: Sondeos eléctricos y electromagnéticos para la exploración de aguas subterráneas en el Chaco Tarijeño (1994), IT CABAS N°24, Dic. 1994
- GARABITO, G., QUIROGA, J., SORUCO, W.: Investigaciones geoeléctricas en la parte norte del Chaco Tarijeño, IT CABAS N°19, Abr. 1994
- GARABITO, G.: Estudio geoeléctrico para la exploración de aguas subterráneas en el área del aeropuerto - Vinto, Oruro, IT CABAS N°14, Ago. 1993
- HUARANCA, R., GARABITO, G., PAREDES, J.: Pozo de investigación Cb-308 I Paucarpata-Valle Central de Cochabamba, IT CABAS N°20, Mayo 1994
- HUARANCA, R., PAREDES, J., SORUCO, W.: Perforación del pozo de investigación Cb-308 III, Paucarpata-Valle Central de Cochabamba, IT CABAS N°28, Dic. 1994
- HUARANCA, R., PASIG, R.: Evaluación Hidrogeológica preliminar del sector suroeste del Departamento de Oruro (Área de las provincias Atahuallpa y Litoral), IT CABAS N°35, Ago. 1996
- KRAMPE, K.: Objetivo, uso y tipos de s hidrogeológicos (según una publicación por W.F. Struckmeier, 1989) , IT CABAS N°42, Dic. 1996
- NEUMANN-REDLIN, CH., HUARANCA, R.: Memoria explicativa del Mapa Hidrogeológico de Bolivia 1:250 000, Hoja Cochabamba , IT CABAS N°38

- NEUMANN-REDLIN, CH., CALLIZAYA, V., DIAZ, J., PASIG, R., RAMIREZ, I.: Mapas hidrogeológicos Chaco Tarijeño: Primeros borradores para dos mapas Hoja 6341 Cochabamba 1:250 000 y Chaco Tarijeño 1:100 000, IT CABAS N°22, Octubre 1994
- NEUMANN-REDLIN, CH., VILLENA, H.: Aspectos adicionales sobre la geología y hidrogeología del Chaco Tarijeño / abanico aluvial del Río Pilcomayo, IT CABAS N°16, Dic. 1993
- NEUMANN-REDLIN, CH., VILLENA, H.: Bibliografía Hidrogeológica del Chaco Sudamericano, IT CABAS N°12, Mar. 1993
- NEUMANN-REDLIN, CH., VILLENA, H.: Primeros aspectos de Hidrogeología del Chaco Tarijeño, IT CABAS N°1, Agosto 1992
- NEUMANN-REDLIN, CH.: Mapa de Ocurrencia de Aguas Subterráneas de Bolivia en la escala 1:2 500 000, concepto de elaboración, IT CABAS N°30, Sept. 1995
- NEUMANN-REDLIN, CH.: Visita al Proyecto Irrigación en Culpina (Dpto. Chuquisaca), IT CABAS N° 3, Agosto 1992
- ORTIZ, R., ZENTENO, J.: Compendio de datos pluviométricos del Chaco Tarijeño Datos hasta 1992, IT CABAS N°13, Mayo 1993
- ORTIZ, R.: Organización computarizada de los datos Hidrogeológicos y Climáticos con Anexos 1-4, IT CABAS N°2, Agosto 1992
- ORTIZ, R.: Organización computarizada de los datos Hidrológicos y Climáticos. Ejemplo del Anuario Hidrogeológico con Anexo 5, Agosto 1992
- PAREDES, J., GARABITO, G., HUARANCA, R., NEUMANN-REDLIN, CH.: Pozos Cb 297 en la propiedad de GEOBOL en Cochabamba (investigación y producción), IT CABAS N°11, Ago. 1993
- PASIG, R., VILLENA, H., CALLIZAYA, V., BUSTAMANTE, M.: Evaluación Hidrogeológica del Chaco Seco, IT CABAS Esp. N°3, Abr. 1995
- PASIG, R., VILLENA, H.: Estudio hidrogeológico del Chaco Tarijeño; Posibilidades de explotación y uso del agua subterránea en el Chaco Tarijeño, IT CABAS N°48, Ene. 1998
- RAMIREZ, I., TORREZ, J.: Evaluación del grado de contaminación de las aguas subterráneas en la ciudad de Tarija y zonas aledañas, IT CABAS N°45, Ago. 1998
- RENNER, S.: Documentación del curso *Introducción a la hidráulica de aguas subterráneas y a la simulación de flujos*, IT CABAS N°43
- ROSSEL, C., ZENTENO, J.: Anuario de información pluviométrica 1993 - Chaco Tarijeño, IT CABAS N°18, Ago. 1994
- ROSSEL, C.: Instalación de Estaciones pluviométricos en el Chaco Tarijeño, IT CABAS N°6, Febr. 1993
- SAAVEDRA, E., ZENTENO, J.: Anuario de información meteorológica 1994 del Chaco Tarijeño, IT CABAS N°32, Feb. 1996
- SAAVEDRA, E.: Anuario de información meteorológica 1994 para la cuenca de Cochabamba, IT CABAS N°31, Dic. 1995
- SCHERDTFEGGER, B.: Documentación del curso *Contaminación de aguas subterráneas*, IT CABAS N°54, Mayo 1998
- SCHILDKNECHT, F.: Manual complementario del equipo de perfilaje geofísico Century y el sistema de control digital "Compu-Log" , IT CABAS N°40, Mar. 1997
- SCHILDKNECHT, F.: Perfilaje geofísico de pozos para la medición de parámetros hidrogeológicos, IT CABAS N°41

- SORUCO, W., HUARANCA, R.: Estudio hidrogeológico en la cuenca de Chaquilla, Potosí, IT CABAS N°52, Mar. 1998
- SORUCO, W.: Estudio geoelectrico area Cienega Pampa, Potosí, IT CABAS Esp. N°6, Jun. 1995
- SORUCO, W.: Estudio geoelectrico en el abanoco de San Martín de Colcha K, Nor Lípez, Potosí, IT CABAS N°50, Mar. 1998
- SORUCO, W.: Estudio geoelectrico en el área de Capinota, Cochabamba, IT CABAS N°49, Ene. 1998
- SORUCO, W.: Estudio geoelectrico en el área de Tolata, Cochabamba, IT CABAS N°51, Ene, 1998
- SORUCO, W.: Estudio geoelectrico en el sector norte del Chaco Tarijeño. Perfil N (Suplemento), IT CABAS N°24, Dic. 1994
- TERRAZAS, E.: Instalación de las Estaciones Hidrométricas (área Yacuiba) , IT CABAS N°26, Dic. 1994
- TORREZ, J.: Ensayo de bombeo, Pozo Cb-308 III, Paucarpatá- Valle Central de Cochabamba, IT CABAS N°29, Abr. 1995
- TORREZ, J.: Perforación del Pozo Cb-308 II, Paucarpatá - Valle-Central de Cochabamba, IT CABAS N°27, Jul. 1994
- VEIT, H.: Estudio geológico de los sedimentos plio-cuaternarios de la cuenca de Cochabamba, IT CABAS N°4, Agosto 1992
- WEILAND, L., TORREZ, J., KOENIG, W.: Instalación de la parte gráfica, Banco de datos hidrogeológico Programa Computacional Hygraf, IT CABAS N°15, Sept. 1993
- WEILAND, L., TORREZ, J.: Instalación del Banco de Datos Hidrogeológico; Programa Computacional HYDAT, IT CABAS N°5, Sept. 1992
- WEILAND, L., KOENIG, W.: Instalación de HYMAP-Una parte del programa computacional de HYDAT para crear mapas topográficos y temáticos, IT CABAS N°34, Nov. 1995
- WEILAND, L., KOENIG, W.: Instalación de una red de computación, IT CABAS N°25, Dic. 1995
- ZAEPEKE, M., FLORES, R.: Hidrogeología de las Pampas de Lequezana, IT CABAS N°56, Jul. 1998

Mapas elaborados por el Proyecto CABAS / *Maps elaborated by the CABAS Project*

- Mapa Hidrogeológico de Bolivia 1:2 500 000** por J. Lizarazu, A. Soria, L. Cortez R., Chr. Neumann-Redlin, publicado por BGR – SERGEOMIN, Cochabamba, 1997
- Posibilidades de Explotación y uso del agua subterránea en el Chaco Tarijeño: Mapa 1:250 000** y memorias explicativas **Estudio hidrogeológico del Chaco Tarijeño**, por R. Pasig, Boletín del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERGEOMIN), N°15, 1998
- Mapa Hidrogeológico de Bolivia 1:250 000, Hoja Cochabamba** y memorias explicativas, por R. Huaranca & Ch. Neumann-Redlin, Boletín del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERGEOMIN), N°16, 1998
- Mapa Hidrogeológico de Bolivia 1:250 000, Hoja Uncía** y memorias explicativas, por R. Huaranca & Ch. Neumann-Redlin, Boletín del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERGEOMIN), 2000, en prep.
- Mapa Hidrogeológico del Valle Central de Cochabamba 1: 50 000**, por G. Colque, tesis de grado, 1998