

ESTUDIO GEOFISICO PARA EL APROVECHAMIENTO DE AGUAS SUBTERRANEAS EN LA ZONA RURAL DE TUMACO (N)

*Orlando Zúñiga E.
Departamento de Física
Universidad del Valle*

Resumen

A solicitud de Plan Padrinos Internacional, sede Tumaco, se realizó una investigación geofísica con miras a definir la viabilidad de captar aguas subterráneas para suplir las necesidades de agua potable en las localidades de Robles, Chilvi, Terán, Chontal, Santo Domingo Bajo y Santo Domingo Alto. La comisión de exploración designada por la Universidad del Valle viajó a la región el día 18 de Febrero de 1990 y regresó el día 26 del mismo mes. Se utilizó el método geoelectrico tipo Schlumberger. El procesamiento de datos geoelectricos se realizó utilizando un filtro digital lineal.

Los resultados obtenidos de la exploración, fueron muy satisfactorios, ya que permitieron planificar la construcción de pequeños pozos, con los cuales se podrá suplir las necesidades de agua potable a las comunidades escogidas.

INTRODUCCION

Aprobada por parte del Plan Padrinos Internacional, sede Tumaco, la propuesta técnica económica, para realizar estudios geofísicos con miras a suplir las necesidades de agua potable en las localidades de Robles, Chilvi, Terán, Chontal, Santo Domingo Bajo y Santo Domingo Alto, la comisión designada por la Universidad del Valle y la compañía de geólogos Luis E. Padilla Ltda., viajó a la región. La comisión se trasladó inicialmente a la

localidad de Terán, donde se tomaron dos SEV (Sondeos Eléctricos Verticales), sucesivamente se corrieron los dos últimos sondeos en la localidad de Santo Domingo Alto, desde donde se retornó a la sede de Tumaco.

La exploración geofísica se realizó utilizando un dispositivo tipo Schlumberger simétrico. Para el procesamiento de datos geoelectricos se utilizó un filtro digital lineal.

Los resultados obtenidos de la exploración realizada fueron muy satisfactorios, ya que para cada localidad se encontró una solución adecuada al suministro de agua potable.

Para Marzo de 1991 se había concluido la construcción de los pozos planificados de acuerdo al estudio geofísico y las localidades de Terán, Santo Domingo Bajo y Alto contaban con suministro de agua potable.

CLIMATOLOGIA

La zona Tumaqueña, de acuerdo a las investigaciones de Gossen (1960) y Morales (1972) se caracteriza por los siguientes factores climáticos:

Lluvias (promedio anual)	2796-2849 mm.
Temperatura (promedio anual)	26°C
Humedad relativa diurna (promedio anual)	70-75%
Humedad relativa nocturna (promedio anual)	100%
Nubosidad	80-90%
Vientos	Baja velocidad
Dirección del viento	W a E

La precipitación promedio pluvial de unos 3000 mm/año, aumenta hasta alcanzar unos 6600 mm/año hacia el sector de El Diviso y La Guayacana, al oriente de Tumaco.

ZONA DE ESTUDIO (UBICACION)

El programa exploratorio se extendió desde la parte continental (Chilvi y Robles), pasando por zonas de deltas y bocanes (Terán y Santo Domingo), hasta zonas costeras (Chontal), cobijando como puede observarse (Figura 1) una amplia gama de ambientes hidrológicos.

La parte continental está comunicada con Tumaco por carreteras, mientras que a las restantes localidades es obligatorio la llegada por vía acuática.

Ante la falta de mapas topográficos o de aerofotografías convencionales de cada una de las áreas exploradas, la ubicación de cada una de ellas se hará gráficamente, referenciándose los puntos de ensayos geofísicos SEV con

respecto a sitios conocidos tales como parques, canchas de fútbol, escuelas, etc.



Figura 1: Localización zonas proyecto

GEOMORFOLOGIA

La zona de Tumaco es el máximo avance occidental de vulcanismo andino, el cual constituye depósitos denominados Unidad Terraza (Arango & Ponce, 1982) desarrollada sobre una inmensa y joven llanura volcánica (Padilla, 1985) con ondulaciones en forma de canoa, conocidas como "guandales", las cuales se encharcan (lagunas) por mal drenaje de los suelos y por la existencia de un hidroapoyo, formado por rocas volcánicas soldadas e impermeables, a muy poca profundidad. La terraza está recubierta por una capa de sedimentos de origen fluvial, principalmente de llanura de inundación, denominada Unidad Aluvial, por Arango & Ponce (1982: op. cit); que evoluciona hasta la Unidad Manglar en dirección a las costas bajas del mar Pacífico (Figura 2). Sobre este paisaje se desarrolla una red hidrográfica de tipo dentrítico a veces angular, cursos sinuosos y estrechos, demostrando

con ello que se trata de formaciones relativamente impermeables. La pendiente en general del terreno es el noroeste-oeste, presentando una línea divisoria muy baja y sutil, que sigue aproximadamente el trazo de la vía Tumaco-Pasto. Esta divisoria separa dos cuencas hidrográficas: al sur y suroeste la del río Mira, y al nor y noroeste la del río Rosario.

No obstante lo anterior y basados en el conocimiento geológico de la zona se recomendó explorar geofísicamente el área, utilizando el método geoelectrico conocido como Sondeo Eléctrico vertical (SEV) para definir las características del subsuelo.

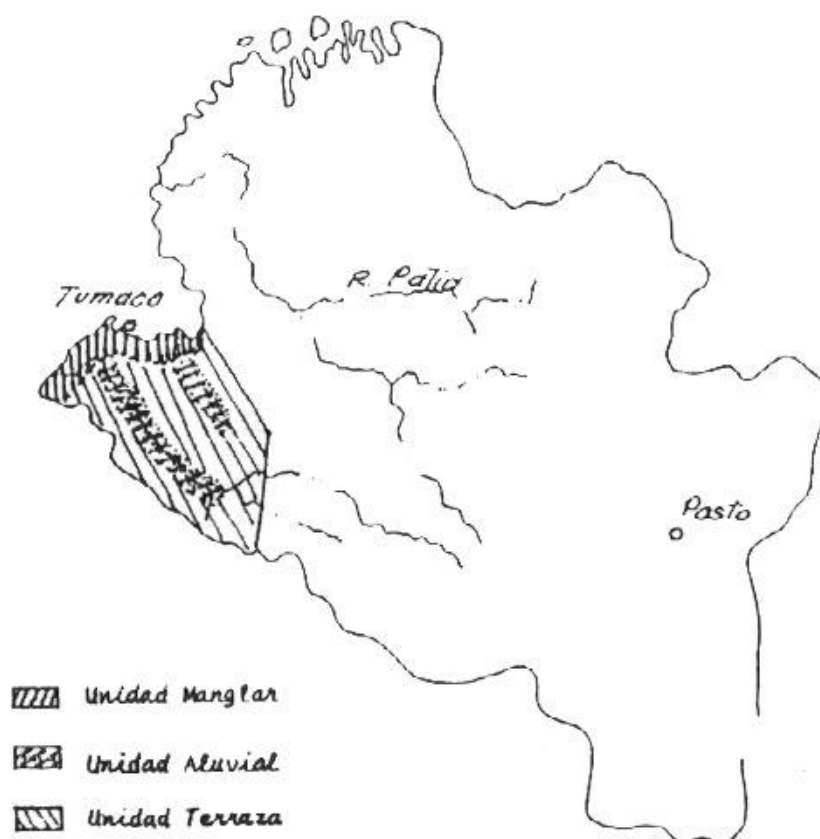


Figura 2: Mapa Geomorfológico

GEOFISICA

La prospección geoelectrica: principios y fundamentos

El fundamento de la prospección geoelectrica está basado en la posibilidad de determinar la resistividad de un subsuelo homogéneo e isotrópico, por medio del denominado método de los cuatro electrodos. Se crea un campo

eléctrico en el suelo, a partir de dos electrodos ($E1$ y $E2$) colocados en la superficie. El potencial tiene una distribución característica de acuerdo a las particularidades del subsuelo. Si medimos la diferencia de potencial (ΔV) entre dos sondas $S1$ y $S2$, también colocados como los electrodos en la superficie, y la intensidad de corriente I entre los electrodos $E1$ y $E2$, así como el factor de configuración geométrica del arreglo, podemos determinar la resistividad aparente del subsuelo ρ_s (resistividad aparente o de campo), en función de la distancia de separación entre los electrodos (ver Figura 3).

$$\rho_s = K \frac{\Delta V}{I}$$

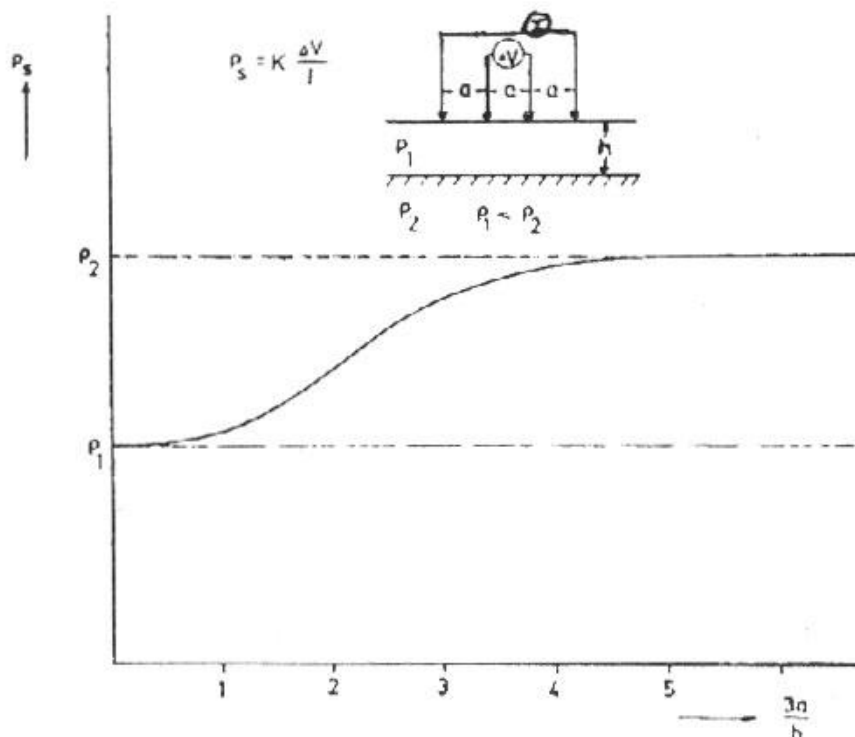


Figura 3

Es tarea de la interpretación geofísica, a partir de la curva de resistividad aparente, medida en la superficie, encontrar la curva de resistividad real del medio en función de la profundidad. Para lograr esta interpretación, se compara la curva de sondeo teórico correspondiente a un modelo geológico conocido del subsuelo, con la curva de resistividad de campo.

Interpretación de los resultados: metodología del procesamiento de datos geoelectricos

Para obtener una interpretación de la curva de resistividad aparente medida en campo, debemos calcular una curva de resistividad correspondiente a un modelo teórico del subsuelo con determinados valores de resistividad de las capas y espesores de las mismas.

Partimos de un modelo teórico del subsuelo formado por N capas con resistividades $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_N$ y espesores $h_1, h_2, \dots, h_N$. Según la ecuación de Laplace para el potencial eléctrico $\nabla^2 V = 0$, la solución final aplicando condiciones de frontera es:

$$V(r) = \frac{\rho_1 I}{2\pi} \left[\frac{1}{r} + 2 \int_0^\infty B(\lambda) J_0(\lambda r) d\lambda \right] = \frac{I}{2\pi} \int_0^\infty T(\lambda) J_0(\lambda r) d\lambda \quad (1)$$

donde:

- $T(\lambda)$ = $\rho_1(1 + 2B(\lambda))$
- ρ_1 : la resistividad de la capa 1
- λ : variable de integración
- $B(\lambda)$: función Kernel
- $T(\lambda)$: función de transformación de la resistencia
- $J_0(\lambda)$: función Bessel

Para un arreglo tipo Schlumberger la resistividad está dada por:

$$\rho_A = -\frac{2\pi S^2}{I} r^2 \left(\frac{dv}{dr} \right)_{r=s} \quad (2)$$

Siendo S la mitad del espaciamiento de los electrodos de corriente, entonces:

$$\rho_A = S^2 \int_0^\infty T(\lambda) J_1(\lambda S) \lambda d\lambda \quad (3)$$

Utilizando la teoría de filtros lineales, se puede obtener una expresión explícita de la transformada de la resistividad, aplicando una inversión de Hankel's:

$$T(\lambda) = \int_0^\infty [\rho_A(S) J_1(\lambda S) / S] dS \quad (4)$$

Tomando: $x = \ln S$; $y = \ln(I/\lambda)$

$$T(y) = \int_0^\infty \rho_A(x) J_1[\exp(x - y)] dx \quad (5)$$

Esta ecuación es una integral de convolución, donde:

$\rho_A(x)$: función de entrada
 $T(y)$: función de salida
 $J_1[e^{x-y}]$: función filtro

En el dominio de la frecuencia:

$$F(f) = G(f)H(f) \quad (6)$$

donde:

$$\begin{aligned}
 T(y) &\leftrightarrow F(f) \\
 \rho_A(x) &\leftrightarrow G(f) \quad (\leftrightarrow \text{transformación de Fourier}) \\
 H(f) &= \text{filtro de resistencia}
 \end{aligned}$$

En el dominio del tiempo, la ecuación equivalente de (6) es:

$$T_m = \sum_i a_i R_{m-i}$$

donde,

m : 0, 1, 2, ...
 a_i : coeficientes directos del filtro
 R_{m-i} : resistividad aparente

El caso inverso de la expresión (6) nos da la resistividad teórica del modelo que hemos supuesto:

$$G(f) = \frac{1}{H(f)} F(f)$$

es decir,

$$R_m = \sum_i b_i T_{m-i} \quad (7)$$

donde,

m : 0, 1, 2, ...
 b_i : coeficientes inversos del filtro
 T_{m-i} : función de transformación de la resistividad

Los valores de la ecuación (7) son entonces calculados (Gosch, 1971) para obtener la resistividad teórica, que se debe comparar iterativamente con la resistividad de campo. Para un modelo de dos capas (A/E) se tiene:

$$T(u) = \rho_A \frac{1 + K_{AB} \exp(-2 EA/u)}{1 - K_{AB} \exp(-2 EA/u)}$$

donde,

$$u = \exp(y)$$

ρ_A, ρ_B = resistividades de las capas A y B

K_{AB} = coeficientes de reflexión = $\frac{\rho_B - \rho_A}{\rho_B + \rho_A}$

La función transformada T para una sección consistente de más de dos capas es determinada por una expresión recursiva del tipo:

$$T_j = \frac{W_i + T_{j+1}(u)}{1 + W_j T_{j+1}(u) / \rho_1^2}$$

Los valores de la resistividad teórica son graficados en función de la distancia interelectródica; esta curva deberá de ser comparada con la curva de resistividad de campo para obtener una interpretación final de los datos geoelectricos medidos.

La Figura 4 nos presenta un diagrama de flujo de la metodología utilizada en el procesamiento de datos geoelectricos.

MANEJO E INTERPRETACION DE DATOS GEOELECTRICOS



Figura 4

DATOS Y RESULTADOS

Equipo

Se utilizó un georesistímetro tipo Hydrosystem TRIO completamente digital de corriente continua y 500 vatios de potencia, con carretes que permiten espaciados interelectrónicos de corriente $L/2=500$ mts., empleando el dispositivo Schlumberger simétrico.

Ensayos geoelectricos en la localidad de Robles

En la localidad de Robles se tomaron tres (3) SEV (sondeos eléctricos verticales) en puntos en los cuales la geología superficial sugería la existencia de agua subterránea.

La solución computarizada de las curvas de campo y la correlación geoelectrica de los SEV arroja el siguiente cuadro:

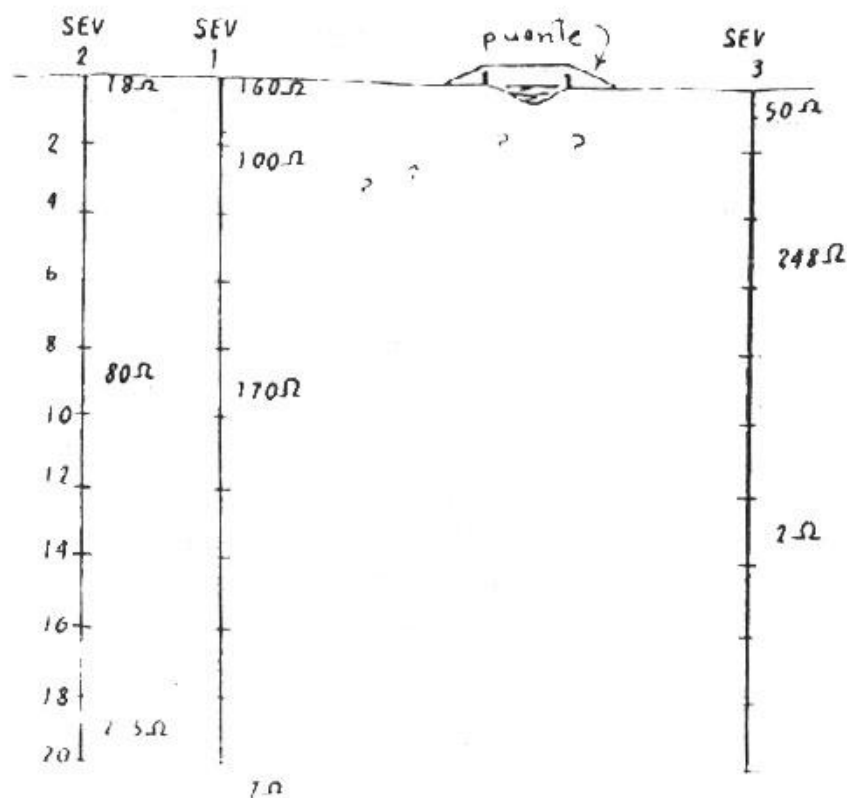


Figura 5

Solución en Robles

La correlación geoelectrica de los tres (3) SEV tomados en Robles permite diagnosticar que el abastecimiento de agua dulce se puede obtener construyendo dos pequeños pozos profundos en el sitio del SEV 2. Dichos pozos se prediseñan de la siguiente manera:

Profundidad exploratoria	Máximo 20 m.
Profundidad a revestir	15 m. (se define a posteriori)
Diámetro perforación	9-10"0
Diámetro revestimiento	6"0
Tipo revestimiento	Tubería FVC, 6"0 200 psi
Tipo de equipo	Perforadora rotaria
Bomba	A definir
Caudal (Q)	50 GFM (aproximadamente)

Se requiere que los pozos se construyan técnicamente y el agua producida se clore mediante dosificadores que funcionan por mera gravedad, cuyo costo es muy bajo.

La misma metodología de tratamiento de los datos geoelectricos se utilizó para las otras localidades. A continuación sólo presentaré sus soluciones y las recomendaciones del caso.

Solución de Chilvi

La correlación geoelectrica de los tres (3) SEV tomados en Chilvi permite plantear como solución la perforación de un pequeño pozo profundo a 15m. de profundidad en el sitio del SEV-2 con el objeto de captar el acuífero libre allí existente. El prediseño del pozo corresponde a:

Profundidad de perforación	15 m.
Diámetro perforación	9-10"0
Diámetro revestimiento	6"0
Tipo revestimiento	Tubería PVC, 6"0, 200 psi
Tipo de equipo	Perforadora rotaria
Caudal (Q)	50 80 GPM
Tipo de Bomba	Sumergible

Igual que en Robles se requiere que el pozo sea técnicamente diseñado y que el agua captada sea clorada utilizando dosificadores que funcionan por mera gravedad de fácil manejo y bajísimo costo.

Solución de Terán

La correlación geoelectrica de los dos SEV tomados en Terán permite plantear como solución la perforación de un pequeño pozo, en el sitio del SEV-2 a 10m. de profundidad, con el siguiente prediseño:

Profundidad exploratoria	Máximo 8 m.
Profundidad de revestimiento	8 m.
Diámetro de perforación	1 m. (aproximadamente)
Diámetro de revestimiento	30"0
Tipo de revestimiento	Tubos de concreto perforados técnicamente
Equipo	Personal de la comunidad
Bomba	Manual
Caudal (Q)	20 GPM

Solución en Chontal

Dado que el agua salada se localiza a unos 6 m. de profundidad, se recomienda construir un aljibe de gran diámetro para que al tiempo que almacena un gran volumen de agua dulce, previene la intrusión de la "cuña-salina".

El prediseño es como sigue:

Profundidad exploratoria	Máximo 5 m.
Profundidad de revestimiento	5 m.
Diámetro de perforación	5 m.
Diámetro de revestimiento	5 m. con tacos de manera hincados en el piso del aljibe
Equipo	Personal de la comunidad
Bomba	Manual
Caudal (Q)	20 GPM

Solución en Santo Domingo Bajo

Correlacionando los dos (2) SEV tomados, puede concluirse que el sitio para ejecutar la construcción de un pozo pequeño corresponde al del SEV 2. La profundidad establecida de unos 7 m., hace recomendable adelantarlo con el empleo del personal de la comunidad contando con asesoría profesional y técnica.

Así las cosas, el prediseño del pozo es como sigue:

Diámetro de perforación	Mínimo 1 m
Profundidad de perforación	7 m.
Diámetro revestimiento	30"0
Tipo de revestimiento	Tubos de concreto perforados técnicamente
Equipo	Personal de la comunidad
Bombas	Manual
Caudal (Q)	20 GPM

Solución en Santo Domingo Alto

La correlación de los dos (2) SEV indica que existen buenas posibilidades para captar agua dulce del acuífero definido entre 0.30 y 25 m. y suplir con ella la demanda de la población. El prediseño del pozo es como sigue:

Profundidad exploratoria	20 m.
Diámetro de perforación	9- 10"0
Diámetro de revestimiento	6"0
Tipo de revestimiento	Tubería PVC, 6"0, 200 psi
Equipo	Perforadora rotaria
Bomba	Manual
Caudal (Q)	50 GPM (aproximadamente)

Bibliografía

- Anderson , W *Linear filter theory : Interpex software*, (1990).
- Astier , P.L. *Geofísica aplicada a la hidrogeología*, Madrid, Paraninfo (1975).
- Bernabine , M., and Cardarelli, E. *The use of filtered Bessel functions in the direct interpretation of geoelectric soundinget geophysical prospecting*, 26, 841-852 (1978).
- Gosh , D.F. *The aplication of linear filter theory to the interpretation of geoelectrical resistivity measurements: Ph.D Thesis Tec Univ Deltt.* (1970).
- Grant , F.S., and West, G.F *Interpretation theory in applied geophysics*. New York McGraw Hill Company (1965).
- Johansen , H.K . and Sorensen, K. *Fast Hankel Transforms Geophysical Prospecting*, 27, 876-901 (1979).

- Kelber , G.U. *Supplementary guide to the literature on electrical properties of rocks and minerals*, New York. Plenum Press (1966).
- Koetbed , D. *Groundsounding Principles 1: Methods in Geochemistry and Geophysics*. 14a. Elsevier Scientific Publishing Company (1979).
- Lourenco , J.S. *International Symposium on Applied in Tropical Regions* (1982).
- Padilla , L.E. y Zúñiga, O. *Estudio de mejoras y ampliación del acueducto de Cali: Informe para EMCALI* (1988).
- Padilla , L.E. y Zúñiga, O. *Estudio de geología y geoeléctrica para el yacimiento carbonífero de Golondrinas: Informe para SMURFITF / Cartón de Colombia*. (1990a).
- Padilla , L.E. y Zúñiga, O. *Estudio de geoeléctrica para la exploración de aguas subterráneas del Municipio de Tumaco (1): Informe para el Plan Internacional Padrinos*. (1990b).
- Padilla , L.E. y Zúñiga, O. *Estudio de geoeléctrica en Puerto Merizalde IV: Informe para la C.V.C.* (1990c).
- Palacky , G.J. *Effect of tropical weathering on electrical and electromagnetic measurement : Geophysics*, 44. (1979).
- Van Overmeeren, R.A. *Aquifer boundaries explored by geoelectrical measurement in the coastal plain of Surinam : A case of equivalent : Geophysics*, 54. 34-48 (1989).
- Verma O.O., and Blechoff, J.H. *Laboratory and field studies of the application of electromagnetic prospecting for groundwater on Marajo Island, Brazil : Geophysics*, 54 (1989).
- Zúñiga , O. *Sistema Integral de Agua-Aylambo: Informe Cajamarca, Perú*, 23-30 (1991a).
- Zúñiga , O. *Unidad integral sostenida Vallejuelo, Zarzal* (1991b).
- Zúñiga , O. *Hydrologische und geophysikalische erforschung des Cauca Tales*. Zeitschrift International. TU Berlin. (1991c).
- Zúñiga , O. *Rahmenbedingungen für eine ländliche Entwicklung*. Zeitschrift International TU Berlin (1991c).

Zúñiga , O. *Unidad de producción sostenida La Carcova*. Universidad del Valle, sede Zarzal. Programa de las Naciones Unidas para el desarrollo (PNUD) (1991e).