

LA DINAMICA FLUVIALE NELLA CORDILLERA ORIENTAL DELLE ANDE (ARGENTINA NORD-OCCIDENTALE)

RIVER DYNAMICS IN THE CORDILLERA ORIENTAL OF THE ANDES (NORTHWESTERN ARGENTINA)

CORRADO CENCETTI (*)

(*) Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università di Perugia - Via G. Duranti 93, 06125 Perugia, Italia - corcen@unipg.it
Department of Civil and Environmental Engineering, University of Perugia - Via G. Duranti 93, 06125 Perugia, Italia - corcen@unipg.it

RIASSUNTO

La nota descrive i processi di dinamica fluviale e di dinamica dei versanti in atto nel settore andino dell'Argentina nord-occidentale (Unità della Cordillera Oriental), analizzandone le cause, in termini di agenti, fattori e condizioni.

Il sollevamento di quest'area di catena è alla base dei fenomeni di erosione e di trasporto di massa riscontrati che sono favoriti sia dalle condizioni climatiche (di tipo subarido, con precipitazioni scarse, ma concentrate in pochi ed intensi eventi), sia dalla presenza di rocce clastiche di età quaternaria - la cui sedimentazione è frutto di periodi più umidi dell'attuale - facilmente degradabili e rimobilizzabili dalla rete idrografica attuale.

Conseguentemente negli alvei fluviali, generalmente di tipo braided, si producono intensi fenomeni di trasporto solido e di alluvionamento. Questi si esplicano tramite colate detritiche che, innescate lungo i versanti, alimentano grandi conoidi alluvionali che invadono gli alvei principali.

I processi geomorfologici in atto nella regione (che generano morfotipi particolari, quali conoidi telescopici terrazzati) possono essere considerati il risultato di due processi apparentemente contrastanti: da un lato l'erosione verticale e il generale approfondimento della rete idrografica dovuti al sollevamento; dall'altro lato la tendenza all'alluvionamento, dovuto alla mobilitazione del materiale clastico dai versanti vallivi, tramite processi di debris flow.

Il risultato è da considerare come espressione del delicato equilibrio tra fattori tettonici da un lato e condizioni climatiche dall'altro: quando la velocità di sollevamento (e quindi di incisione della rete idrografica) prevale sull'apporto detritico dai versanti (dipendente dalle condizioni climatiche, più o meno umide) si ha erosione in alveo; viceversa (e questa sembra essere la condizione generale attuale), quando l'apporto detritico dai versanti è sovrabbondante rispetto alla capacità di smaltimento del trasporto solido dei corsi d'acqua ed all'erosione lineare dovuta al sollevamento, la tendenza è all'aggradazione degli alvei fluviali che comporta evidenti condizioni di rischio geologico-idraulico da inondazione.

La Quebrada de Humahuaca (Alta Valle del Rio Grande), nella provincia di Jujuy, costituisce un ottimo esempio di quanto appena descritto sulla particolare e complessa dinamica morfologica di quest'area

ABSTRACT

The paper describes the river dynamics and slope dynamics processes taking place in the section of the Andes in northwestern Argentina (Cordillera Oriental Unit), analyzing the causes in terms of agents, factors and conditions.

The rising of this area of the chain is at the basis of the erosion and debris flow phenomena found there, which are favored both by climatic conditions (subarid, with little precipitation that is concentrated in infrequent but intense rains) and by the presence of clastic Quaternary rocks - the sedimentation of which is the fruit of wetter periods than the present - which are easily degradable and remobilizable by the present channel net.

Consequently intense solid transport and alluviation phenomena are produced in the river channels, which are generally of the braided type. These take place by means of debris flows that, when triggered along the slopes, feed large alluvial fans that invade the main river channels.

The geomorphological processes taking place in the region (which generate unusual morphotypes, such as terraced telescopic fans) can be considered the result of two apparently contrasting processes: on the one hand, vertical erosion and the general deepening of the channel net due to rising; on the other, the tendency toward alluviation, due to the mobilization of the clastic material from valley slopes through debris flow processes.

The result should be considered as the expression of the delicate equilibrium between tectonic factors and climatic conditions: when the rate of rising (and thus of the cutting of the channel net) prevails over the contribution of debris from the slopes (depending on wetter or drier climatic conditions), there is erosion in the channel; vice versa (and this seems to be the overall condition at the time), when the contribution of debris from the slopes is abundant compared to the rivers' capacity to carry off the solid transport and compared to the linear erosion due to rising, the tendency is toward the aggradation of the river channels, which brings about evident conditions of geologic-hydraulic risk due to flooding.

The Quebrada de Humahuaca (Upper Valley of the Rio Grande), in the Jujuy province, is an excellent example of the phenomena just described on the particular and complex morphological dynamics of

della Cordillera Andina. In molti casi, sia i villaggi presenti lungo le aste fluviali del Rio Grande e dei suoi affluenti, sia le vie di comunicazione che percorrono la valle principale soffrono tale situazione che preclude, allo stato attuale, lo sviluppo socio-economico di una regione con enormi potenzialità, grazie alla sua vocazione turistica.

TERMINI CHIAVE: *Argentina nord-occidentale, dinamica fluviale, rischio*

PREMESSA

Nell'area della *Cordillera Oriental* delle Ande, nell'Argentina nord-occidentale, il processo del trasporto di massa assume proporzioni tali da poter essere considerato il principale attore nel modellamento del rilievo.

Tale processo si esplica sia tramite movimenti di massa lungo i versanti (principalmente colate detritiche), sia tramite il fenomeno del trasporto solido nei corsi d'acqua, la cui evoluzione - stante la scarsa azione antropica di controllo - è condizionata essenzialmente dalle caratteristiche climatiche, di tipo subarido, e da fattori litologici e geologico-strutturali (HERMANN & STRECKER, 1999).

La presente nota intende descrivere i processi geomorfologici in atto in questo settore della Cordillera delle Ande, individuando i fattori, le cause e le condizioni climatiche che sono alla base dei processi stessi.

CARATTERISTICHE GEOGRAFICO-FISICHE E MORFOSTRUTTURALI DEL NORDOVEST ARGENTINO

Nell'Argentina nord-occidentale, che dal punto di vista amministrativo comprende le Province di Salta e di Jujuy, possono essere individuate tre unità fisiografiche caratterizzate da condizioni geologico-strutturali, morfologiche e climatiche nettamente distinte. Da ovest verso est (Fig. 1): la Puna, la Cordillera Oriental e le Sierras Subandinas (IGARZABAL, 1982).

Di seguito è riportata una breve descrizione delle unità più estreme (Puna e Sierras Subandinas), mentre ci si soffermerà più dettagliatamente sull'unità centrale (Cordillera Oriental) e, in particolare, sulla sua valle centrale, la Quebrada de Humahuaca, oggetto specifico della presente nota.

LA PUNA

La Puna (nel linguaggio Quechua, il tipico idioma andino, il termine significa "deserto", "terra fredda") rappresenta la continuazione meridionale dell'Altopiano Boliviano. È costituita da un basamento cristallino sollevato, che raggiunge un'altitudine media di 3800 m s.l.m. (SEGEMAR, 1998), caratterizzato dalla presenza di dorsali montuose allungate in direzione Nord-Sud (alcune con vette che sfiorano 6.000 m s.l.m.), intervallate a conche endoreiche.

Sono rari, attualmente, i ghiacciai attivi (Nevado de Poquis, 5.770 m s.l.m.; Nevado de San Pedro, 5.995 m s.l.m.); durante il Pleistocene, tuttavia, tutti i rilievi furono coperti dai ghiacci almeno tre volte (AHUMADA, 2002).

Al piede dei versanti si trovano potenti accumuli detritici, dovuti

this area of the Andine Cordillera. In many cases, both the villages along the courses of the Rio Grande and its tributaries and the roads running through the main valley suffer from this situation, which precludes, in the present state, the socioeconomic development of a region with enormous potentialities, thanks to its attractiveness to tourists.

KEY WORDS: *northwestern Argentina, river dynamics, risk*

INTRODUCTION

In the area of the *Cordillera Oriental* of the Andes, in northwestern Argentina, the mass wasting reaches proportions such that it can be considered the main process in the modelling of the landscape.

This process unfolds by means of mass movements along the slopes (mainly debris flows) as well as by the phenomenon of solid transport in rivers and streams, the evolution of which - there being little control by man - depends essentially on climatic characteristics, which are subarid, and lithological and geological-structural factors (HERMANN & STRECKER, 1999).

This paper intends to describe the geomorphological processes taking place in this section of the Andes Cordillera, identifying the factors, causes and climatic conditions at the foundation of these processes.

GEOGRAPHICAL-PHYSICAL AND MORPHOSTRUCTURAL CHARACTERISTICS OF NORTHWESTERN ARGENTINA

In northwestern Argentina, which includes the provinces of Salta and Jujuy, three physiographic units can be identified that are characterized by clearly distinct geological-structural, morphological and climatic conditions. From the west toward the east (Fig. 1) are: the Puna, the Cordillera Oriental and the Sierras Subandinas (IGARZABAL, 1982).

A brief description is given below of the outer units (Puna and Sierras Subandinas), while the central unit (Cordillera Oriental) will be examined more in depth, especially in its central valley, the Quebrada de Humahuaca, which is the specific topic of this paper.

THE PUNA

The Puna (in Quechua, the typical language of the Andes, the word means "desert," "cold land") is the southern continuation of the Bolivian Plateau. It is made up of a raised crystalline basement, which reaches an average elevation of 3800 meters a.s.l. (SEGEMAR, 1998), characterized by mountain ridges extending in a north-south direction (some with peaks of almost 6,000 m), broken by endorheic basins.

Active glaciers are currently rare (Nevado de Poquis, 5,770 m; Nevado de San Pedro, 5,995 m); during the Pleistocene, however, all the mountains were covered by ice at least three times (AHUMADA, 2002).

There are large accumulations of detritus at the foot of the slopes,

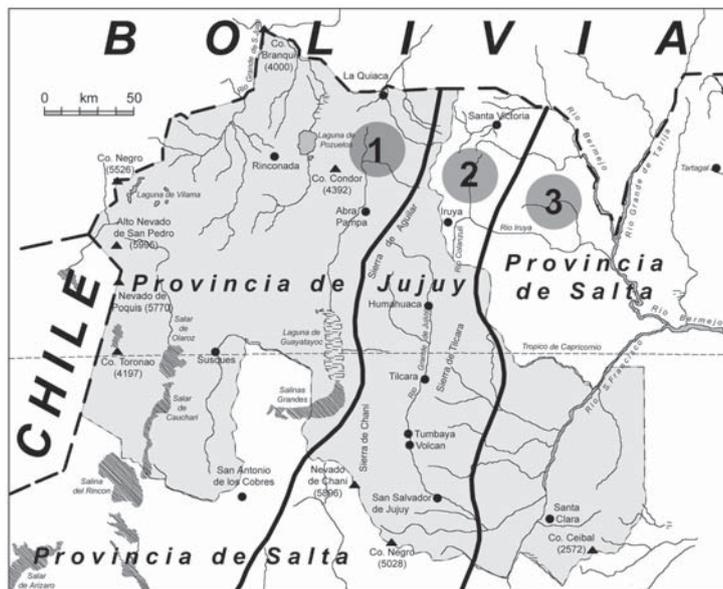


Fig. 1 - Le unità morfologiche dell'Argentina nord-occidentale. Le linee tratteggiate marcano i confini di Stato; in grigio la provincia di Jujuy, il cui territorio è completamente circondato, in Argentina, dalla provincia di Salta. Le linee in grassetto, a tratto continuo, rappresentano i limiti tra le unità morfologiche: 1) Puna; 2) Cordillera Oriental; 3) Sierras Subandinas

- The morphological units of Argentina. The dashed lines mark State boundaries; in grey the province of Jujuy, completely surrounded, in Argentina, by the land of the province of Salta. The black continuous lines stand for the boundaries between the morphological units: 1) Puna; 2) Cordillera Oriental; 3) Sierras Subandinas

soprattutto alle condizioni climatiche di tipo periglaciale che interessarono l'area durante tutto il Pleistocene superiore e l'Olocene, ma anche a quelle attuali, di tipo arido, che permettono l'espletarsi di processi di weathering fisico. Anche se il fenomeno del crioclastismo non è da escludere alle quote più elevate, in condizioni particolari di ritenzione idrica nelle rocce (AHUMADA, 2002), attualmente è il termoclastismo il processo di disgregazione fisica dominante, dovuto alla presenza di un clima freddo, molto secco, ma con oscillazioni termiche giornaliere spesso superiori a trenta gradi (da temperature inferiori a 0°C di notte, fino a oltre 30°C di giorno). Pur prendendo atto della scarsità di dati termometrici a disposizione, reperibili in letteratura, si può affermare allo stato delle conoscenze attuali che la temperatura media annuale nella Puna è inferiore a 5°C, mentre la media delle temperature massime annuali e la media delle temperature minime annuali sono pari, rispettivamente, a 16° e -4° (AHUMADA, 2002).

Il deficit idrico, inteso come differenza tra l'evapotraspirazione potenziale e le precipitazioni registrate, caratterizza l'intero corso dell'anno, a causa della scarsità delle precipitazioni, che non raggiungono mai valori superiori a 100 mm/anno; in molte aree della Puna la media è inferiore a 50 mm/anno. Le precipitazioni sono irregolari e comunque presenti solo nel periodo estivo, con valori via via decrescenti da Est verso Ovest. L'evapotraspirazione è alta, con il risultato che il valore medio annuale di umidità relativa è pari al 40% (GARCIA, 1990; MINETTI, 1999).

A causa del basso grado di umidità e dell'alto irraggiamento solare, sui terreni sciolti che occupano il fondo delle conche endoreiche si formano accumuli salini (soprattutto borati), prodotti dal weathering delle rocce vulcaniche che affiorano sui rilievi. Tali accumuli danno luogo a deserti di sale, denominati *salares* o *salinas* (IGARZABAL, 1982), che presentano le tipiche strutture poligonali dovute alla risalita per capillarità di soluzioni concentrate.

due above all to the periglacial climate conditions existing in the area during the entire upper Pleistocene and the Holocene, but also to the present-day arid climate, which gives rise to physical weathering processes. Although cryoclastism cannot be ruled out at the highest altitudes, in particular conditions of water retention in the rocks (AHUMADA, 2002), at present thermoclastism is the dominant physical disintegration process, due to a climate that is cold and very dry, but with daily temperature fluctuations often of over thirty degrees Celsius (from temperatures below 0°C at night up to over 30°C in the daytime). Though taking into consideration the scarcity of temperature data available in the literature, it can be said that at present it is known that the average annual temperature in the Puna is less than 5°C, whereas the average annual high and low temperatures are 16°C and -4°C respectively (AHUMADA, 2002).

The water deficit, understood as the difference between potential evapotranspiration and the rainfall recorded, characterizes the entire course of the year, due to the scarcity of precipitation, which never exceeds 100 mm/year; in many areas of the Puna the average rainfall is less than 50 mm/year. Precipitation is irregular and occurs only during the summer, with values gradually decreasing from east to west. Evapotranspiration is high, with the result that the average annual relative humidity is 40% (GARCIA, 1990; MINETTI, 1999).

Because of the low degree of humidity and the high solar radiation, saline accumulations (especially borates) are formed on the loose soils occupying the bottom of the endorheic basins. These accumulations are produced by the weathering of the volcanic rocks that outcrop on the reliefs, and form salt deserts, called *salares* or *salinas* (IGARZABAL, 1982), which show the typical polygonal structures due to the rising up of concentrated solutions from capillary action.

LE SIERRAS SUBANDINAS

Le Sierras Subandinas costituiscono l'area di raccordo morfologico tra la Cordillera Oriental, ad ovest, e la Llanura Chaqueña ad Est (la grande pianura di circa 100.000 km² che si estende in tutta la Provincia del Chaco, solcata dai sistemi fluviali del Paraná e del Teuco-Bermejo, a drenaggio atlantico).

Sono caratterizzate da rilievi di modesta altitudine, per lo più compresi tra 1000 e 1500 m s.l.m. (il maggiore è il Cerro Ceibal, 2572 m s.l.m.) che presentano una direzione di sviluppo preferenziale NE-SW e sono coperti da vegetazione di tipo subtropicale.

È forte il controllo strutturale sulla morfologia: i maggiori rilievi coincidono infatti con le linee di cerniera di anticlinali asimmetriche, vergenti verso Est (MON, 1976; MINGRAMM *et alii*, 1979), mentre i sistemi vallivi principali sono condizionati dalla presenza di sinclinali.

A causa della loro orientazione, le dorsali montuose intercettano i venti umidi provenienti da Est, provocando precipitazioni di tipo orografico che raggiungono un valore medio annuale superiore a 1500 mm/anno, progressivamente decrescente da est verso ovest. Il clima, così, è tipicamente subtropicale, caldo, umido e piovoso, ma con inverni freddi. Per esempio, nella zona del Valle de Lerma, a Sud di Salta, la temperatura media è di 23°C in estate, con massime assolute giornaliere prossime ai 40°, ma in inverno si raggiungono spesso valori minimi assoluti giornalieri di -10° (MINETTI, 1999).

LA CORDILLERA ORIENTAL

Anche la Cordillera Oriental presenta caratteri morfologici peculiari, distinguendosi nettamente dalle Unità tra le quali si inserisce.

La Cordillera Oriental argentina, che rappresenta il prolungamento meridionale della Cordillera Oriental e Central della Bolivia, può essere considerata la vera "spina dorsale" delle Ande (SALFITY *et alii*, 1975; 1984b). È caratterizzata dall'allineamento di una serie di rilievi che, sempre nel settore argentino, presentano un'ampiezza totale di circa 80 km e sono riconducibili a due elementi principali, disposti approssimativamente in direzione NNE-SSW (fig. 1): quello della Sierra de Aguilar - Sierra de Chañi e quello della Sierra de Tilcara, divisi tra loro dal solco vallivo del Rio Grande de Jujuy, che fa parte del bacino del Rio Paraná - Rio de la Plata.

L'allineamento Sierra de Chañi - Sierra de Aguilar raggiunge quote più elevate ed è sede di ghiacciai permanenti (come il Nevado de Aguilar e il Nevado de Chañi, che raggiunge quota 5896 m s.l.m.). La Sierra de Tilcara, ad est, non presenta ghiacciai permanenti ed è caratterizzata da rilievi più bassi, situati a quote inferiori a 5000 m s.l.m.

L'immagine LANDSAT riportata in figura 2 evidenzia la netta differenza morfologica tra la Puna argentina e la Cordillera Oriental; in figura è stato indicato anche il tracciato della porzione mediana della Quebrada de Humahuaca, con il quale nome viene indicata l'Alta Valle del Rio Grande de Jujuy, compresa tra l'area di testata e la città di San Salvador de Jujuy, capoluogo dell'omonima provincia.

THE SIERRAS SUBANDINAS

The Sierras Subandinas are the morphological link between the Cordillera Oriental to the west and the Llanura Chaqueña to the east (the great plain roughly 100,000 km² in area that covers all of the province of Chaco, crossed by the Paraná and Teuco-Bermejo river systems, flowing into the Atlantic).

They are characterized by lesser peaks, mostly between 1000 and 1500 meters a.s.l. (the highest is Cerro Ceibal, 2572 m), which develop mostly in a NE-SW direction and are covered by subtropical vegetation.

The morphology is strongly influenced by the structure: the highest peaks coincide in fact with the hinge lines of asymmetrical anticlines, verging toward the east (MON, 1976; MINGRAMM *et alii*, 1979), while the main valley systems are influenced by the presence of synclines.

Because of their orientation, the mountain ridges intercept the moist winds coming from the east, causing orographic-type precipitation that reaches an annual average value of over 1500 mm/year, which decreases progressively going from east to west. Thus the climate is typically subtropical, hot, humid and rainy, but with cold winters. For example, in the Valle de Lerma area, south of Salta, the average temperature is 23°C in summer, with daily highs around 40°C, but in the winter the daily lows often reach -10°C (MINETTI, 1999).

THE CORDILLERA ORIENTAL

The Cordillera Oriental also has particular morphological characteristics, distinctly different than the units it lies between.

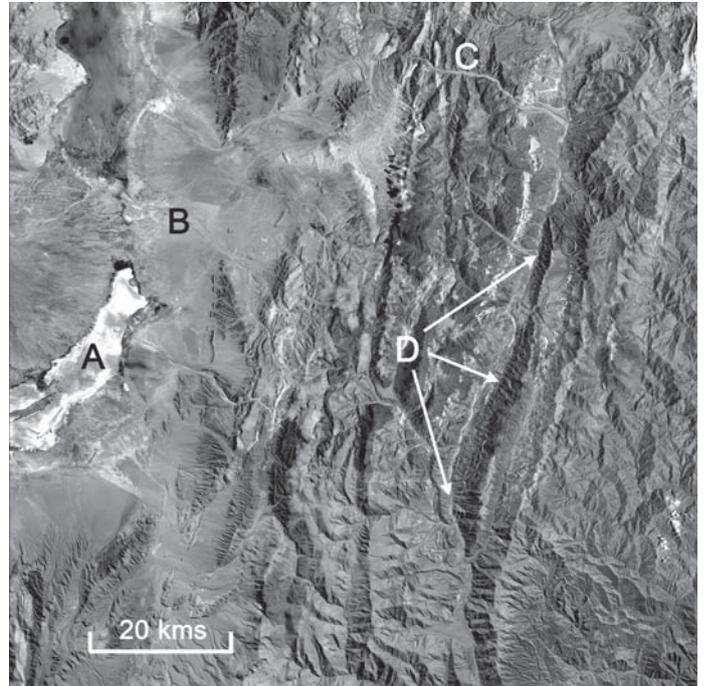
The Argentine Cordillera Oriental, which is the southern extension of the Cordillera Oriental and Central of Bolivia, can be considered the true "backbone" of the Andes (SALFITY *et alii*, 1975; 1984b). It is characterized by the alignment of a series of peaks, also within the Argentine section, that have a total width of about 80 km and can be traced to two main elements, oriented in an approximately NNE-SSW direction (Fig. 1): that of the Sierra de Aguilar - Sierra de Chañi and that of the Sierra de Tilcara, which are divided by the Rio Grande de Jujuy valley, which is part of the Rio Paraná - Rio de la Plata basin.

The Sierra de Chañi - Sierra de Aguilar alignment reaches very high elevations and has permanent glaciers (such as the Nevado de Aguilar and the Nevado de Chañi, which reaches a height of 5896 meters). The Sierra de Tilcara, to the east, does not have permanent glaciers and is characterized by lower peaks, at elevations lower than 5000 meters.

The LANDSAT image given in Figure 2 shows the sharp morphological difference between the Argentine Puna and the Cordillera Oriental; the figure also shows the stretch of the median portion of the Quebrada de Humahuaca, the name given to the upper valley of the Rio Grande de Jujuy, from the head of the valley to the city of San Salvador de Jujuy, the capital of the province of the same name.

Fig. 2 - Immagine LANDSAT dell'Altopiano della Puna (B) - dove sono evidenti le depressioni endoreiche in cui si ha sedimentazione di tipo evaporitico, note come *salares* o *salinas* (A) - e della Cordillera Oriental (C), in cui è chiaro il controllo geologico-strutturale sulle forme del rilievo. È indicata anche la Quebrada de Humahuaca (D) corrispondente all'Alta Valle del Rio Grande de Jujuy

- A LANDSAT image of Puna Highland (B) - with the endoreic depressions, named *salares* and *salinas*, affected by salty sedimentation (A) - and Cordillera Oriental (C), where the structural geological control on the forms of landscape is evident. Quebrada de Humahuaca (Upper Valley of Rio Grande de Jujuy) is also pointed out (D)



LA QUEBRADA DE HUMAHUACA

La Quebrada de Humahuaca, dichiarata "Patrimonio dell'Umanità" dall'UNESCO nel 2003, rappresenta il naturale collegamento tra Argentina e Bolivia ed "...è stata utilizzata negli ultimi 10.000 anni quale passaggio cruciale per il transito di popoli ed idee dalle alte terre andine alle aree di pianura..." (questa una delle motivazioni ufficiali per il suo riconoscimento quale "Patrimonio dell'Umanità" dell'UNESCO), come testimoniato anche da diversi ed importanti siti di interesse archeologico ivi presenti (ALBECK, 1993).

Attualmente, tuttavia, l'intera area della Quebrada versa in uno stato di forte degrado socio-economico (REBORATTI, 2003), imputabile principalmente alla inefficienza delle linee di comunicazione esistenti. Ciò, a causa delle condizioni di rischio da debris flow (CENCETTI *et alii*, 2001) che, di fatto, hanno reso inutilizzabile l'unica linea ferroviaria presente - il Ferrocarril "General Belgrano", chiuso agli inizi degli anni '90 per le ingenti spese di manutenzione richieste - e provocano continue interruzioni del tracciato stradale più importante, la Ruta Panamericana Nacional n. 9 "Juan Batista Alberdi". Quando questa comunicazione stradale viene interrotta (fatto frequente, specialmente in occasione degli eventi meteorici estivi, che provocano l'innesco di colate detritiche dai versanti), l'isolamento è totale, sia dalla Bolivia, sia dal resto della province argentine di Jujuy e di Salta.

In fig. 3 è rappresentato schematicamente il reticolo idrografico del Rio Grande corrispondente al bacino della Quebrada, fino alla sezione del Dique Los Molinos, uno sbarramento artificiale del corso d'acqua situato nei pressi di Reyes, immediatamente a monte della città di San Salvador de Jujuy, capoluogo dell'omonima provincia.

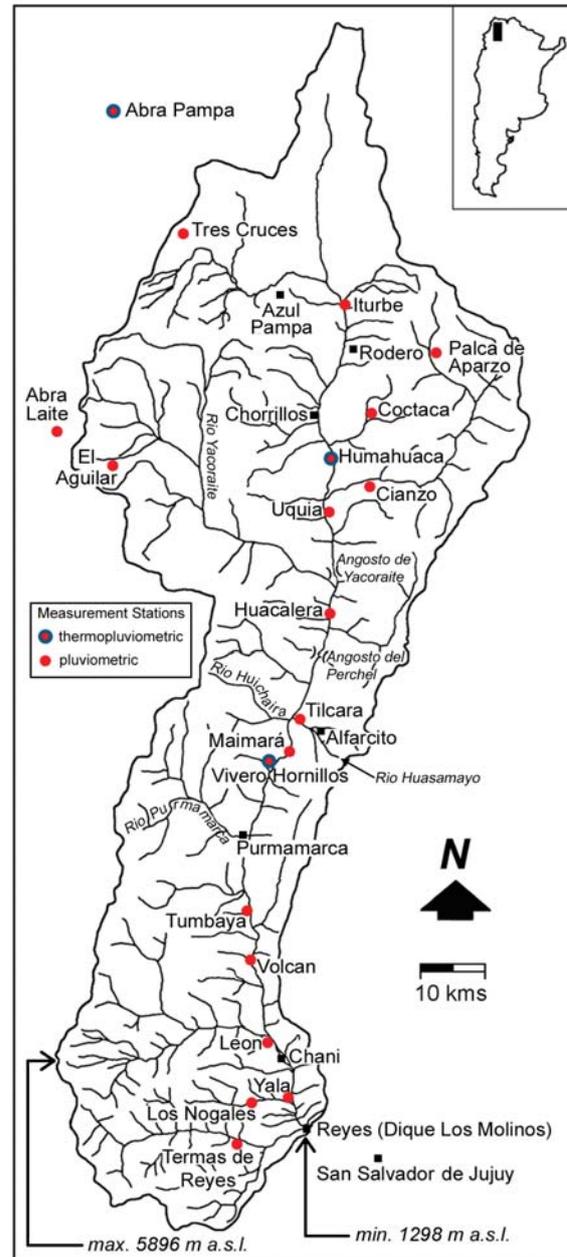
THE QUEBRADA DE HUMAHUACA

The Quebrada de Humahuaca, declared a natural "Heritage of Humanity" by UNESCO in 2003, is the natural link between Argentina and Bolivia and "...it was used in the last 10,000 years as a crucial passageway for the transit of peoples and ideas from the Andine highlands to the plains areas" (this is one of the official reasons for its recognition as a UNESCO "Heritage of Humanity"), as is evidenced by a number of important archeological sites found there (ALBECK, 1993).

Right now, however, the entire Quebrada area is in a state of serious socioeconomic degradation (REBORATTI, 2003), attributable mainly to the inefficiency of the existing lines of communication. This is due to the conditions of risk from debris flows (CENCETTI *et alii*, 2001) which have made unserviceable the only railroad line present - the Ferrocarril "General Belgrano," closed in the 1990s because of the enormous maintenance costs - and cause continuous interruptions in the most important road, the Ruta Panamericana Nacional n. 9 "Juan Batista Alberdi". When this highway is interrupted (a frequent event, especially following summer rains, which set off debris flows from the slopes), the area remains totally isolated, both from Bolivia and from the rest of the Argentine provinces of Jujuy and Salta.

Figure 3 gives a schematic representation of the Rio Grande channel net, which corresponds to the Quebrada basin, up to the section of the Dique Los Molinos, an artificial dam on the river near Reyes, just upstream from the city of San Salvador de Jujuy, the provincial capital.

Fig. 3 - Reticolo idrografico schematico del bacino della Quebrada de Humahuaca, sotteso dallo sbarramento artificiale di Los Molinos, nei pressi di San Salvador de Jujuy. Sono anche indicate le principali stazioni pluviometriche e termopluviometriche considerate ai fini di una caratterizzazione climatica dell'area
 - Sketch of hydrographic net in the Quebrada de Humahuaca watershed, subtended by Los Molinos Dam, close to San Salvador de Jujuy. The main pluviometric and thermopluviometric measurement stations are also pointed



CARATTERISTICHE GEOLOGICHE GENERALI

In fig. 4 è stato ridisegnato (e modificato in base ad altri contributi - SEGEMAR, 1998) dall'originale del Servizio Geologico Argentino in scala 1:100.000, uno schema geologico che copre gran parte del bacino della Quebrada e le aree limitrofe.

La caratteristica più evidente, osservando la carta geologica, è la presenza di estesi affioramenti di formazioni precambriche e del Paleozoico inferiore, mentre sono praticamente assenti le formazioni del Paleozoico superiore (dal Siluriano in poi), a differenza della

GENERAL GEOLOGICAL CHARACTERISTICS

In Fig. 4 a geological sketch covering most of the Quebrada basin and surrounding areas was redrawn (and modified on the basis of other contributions - SEGEMAR, 1998) from the original by the Argentine Geologic Service in 1:100,000 scale.

Looking at the geological map, the most evident characteristic is the presence of extensive outcroppings of Precambrian and Lower Paleozoic formations, whereas formations from the Upper Paleozoic (from the Silurian on) are practically absent, unlike the nearby

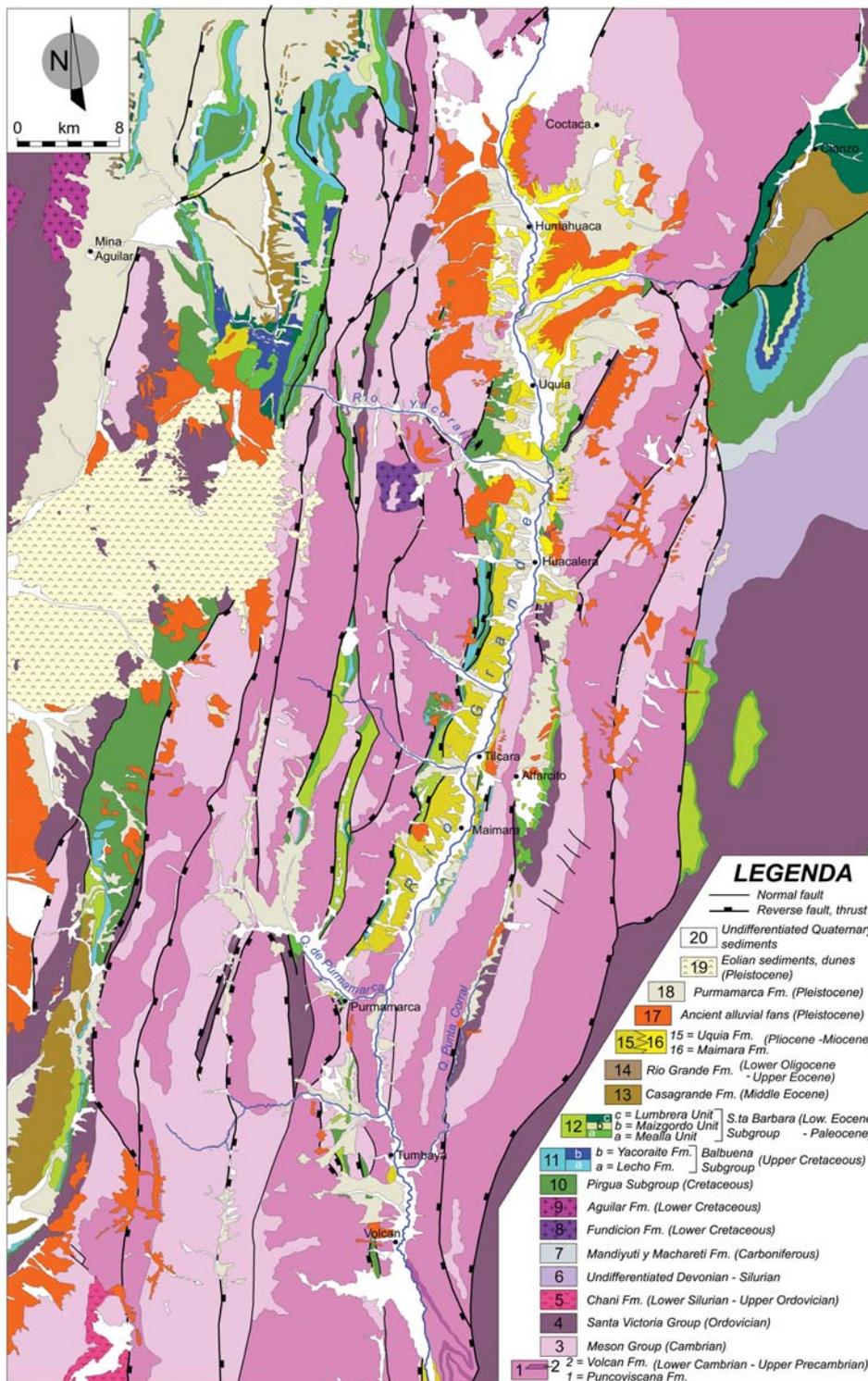


Fig. 4 - Schema geologico della porzione centrale del bacino della Quebrada de Humahuaca (ridisegnato e modificato da SEGEMAR, 1998)
 - Geological sketch of Quebrada de Humahuaca, central portion (redrawn and modified by SEGEMAR, 1998)

vicina unità delle Sierras Subandinas, situata ad est, dove è invece presente una potente serie silurico-devonico-carbonifera e sono molto diffusi sedimenti mesozoici e cenozoici.

Nell'area della Quebrada una lacuna stratigrafica si estende dalla fine del Paleozoico al Cretaceo inferiore. Tuttavia, anche i sedimenti terziari sinorogenici alla compressione andina, che invece caratterizzano sia le Sierras, sia ampi settori della Puna, appaiono nella Quebrada in affioramenti scarsi e frammentati (SEGEMAR, 1998).

Invece, va segnalata nella Quebrada l'abbondante presenza di sedimenti clastici pliocenici e quaternari che occupano soprattutto l'area centrale della valle, spesso deformati e fagliati dall'attività tettonica recente, che è sempre di tipo compressivo (SOLIS, 1993).

Segue una descrizione litologico-stratigrafica delle principali formazioni presenti nell'area della Quebrada e nei territori limitrofi, rimandando ai lavori indicati come riferimenti bibliografici per eventuali approfondimenti di questi aspetti.

LITOLOGIA E STRATIGRAFIA

La formazione più antica presente risale al Precambriano (Formación Puncoviscana - TURNER, 1960; 1963; ACEÑOLAZA, 1973; ACEÑOLAZA & DURAND, 1973; HALPERN & LATORRE, 1973; SALFITY *et alii*, 1975). È una formazione flyschioide, debolmente metamorfosata, potente circa 1500 m, costituita da alternanze di argilliti, filladi, grovacke e scisti quarziticci. Al suo interno, nella parte superiore, è stata evidenziata in carta l'unità litostratigrafica denominata Formación Volcán, una breccia sinsedimentaria all'interno del flysch della Formación Puncoviscana (LOSS & GIORDANA, 1952), presente esclusivamente nella porzione meridionale della Quebrada, in riva sinistra. Lo spessore massimo è pari a 500 m.

Seguono, in discordanza angolare, al di sopra della Puncoviscana, le Unità del Grupo Mesón, del Cambriano (TURNER, 1960) e del Grupo Santa Victoria dell'Ordoviciano (HARRINGTON & LEANZA, 1957; TURNER, 1960; ZANETTINI, 1973; AMENGUAL & ZANETTINI, 1974).

La prima è costituita da conglomerati ed arenarie, tipici della deposizione in un sistema fluviale braided, fino ad un ambiente di piana costiera e di piattaforma a sedimentazione clastica prossimale (arenarie rossastre mature, tipo arcose, e argilliti). Lo spessore totale è modesto (200-300 m). La seconda è costituita da un conglomerato basale a cui seguono arenarie ed argille, tipiche di ambiente di piattaforma continentale distale. Lo spessore massimo è pari a 1250 m.

La Formación Chañi (MENDEZ, 1975) affiora all'estremità meridionale della Quebrada. Si tratta di un modesto affioramento di granito calcalalino, di colore rosato. Datazioni radiometriche lo riferiscono all'Ordoviciano superiore - Siluriano inferiore.

Gli affioramenti del Siluriano-Devoniano nella Quebrada e, in generale, in tutta la Cordillera Oriental sono scarsi e maggiormente rappresentati nell'Unità delle Sierras Subandinas (TURNER, 1960). Per questo motivo sono stati riuniti sotto il termine "indifferenziato". Alla base si trova un sottile livello (10-15 m), di arenarie grigio-

Sierras Subandinas unit, located to the east, where instead there is a thick Silurian-Devonian-Carboniferous series and Mesozoic and Cenozoic sediments are very common.

In the Quebrada area a stratigraphic gap extends from the end of the Paleozoic to the Lower Cretaceous. However, the Tertiary sediments synorogenic with the Andine compression, which instead characterizes both the Sierras and ample sections of the Puna, also appear in the Quebrada in rare and fragmented outcroppings (SEGEMAR, 1998).

It should be pointed out that in the Quebrada there is an abundant presence of Pliocene and Quaternary clastic sediments that occupy above all the central area of the valley, often deformed and faulted by recent tectonic activity, which is always compressive (SOLIS, 1993).

A lithological-stratigraphic description of the principal formations in the Quebrada area and in the neighboring areas is given below, referring to the works indicated as bibliographic references for any further investigation of these aspects.

LITHOLOGY AND STRATIGRAPHY

The oldest formation goes back to the Precambrian (Formación Puncoviscana - TURNER, 1960; 1963; ACEÑOLAZA, 1973; ACEÑOLAZA & DURAND, 1973; HALPERN & LATORRE, 1973; SALFITY *et alii*, 1975). It is a flyschoid formation, weakly metamorphosed, about 1500 m thick, made up of alternations of argillites, phyllades, graywackes and quartzitic schists. Inside, in the upper part, the lithostratigraphic unit called Formación Volcán is shown on the map, a sinsedimentary breccia inside the flysch of the Formación Puncoviscana (LOSS & GIORDANA, 1952), present exclusively in the southern portion of the Quebrada, on the left bank. The maximum thickness is 500 m.

Following on top of the Puncoviscana, in angular unconformity, are the Grupo Mesón Unit, from the Cambrian (TURNER, 1960) and the Grupo Santa Victoria Unit from the Ordovician (HARRINGTON & LEANZA, 1957; TURNER, 1960; ZANETTINI, 1973; AMENGUAL & ZANETTINI, 1974).

The former is made up of conglomerates and sandstones, typical of settling in a braided river system, up to an environment of coastal plain and of proximal clastic sedimentation (mature reddish sandstones, such as arkose, and argillites). The total thickness is moderate (200-300 m). The latter is made up of a basal conglomerate, followed by sandstones and clays, typical of a distal continental shelf. The maximum thickness is 1250 m.

The Formación Chañi (MENDEZ, 1975) outcrops at the southern edge of the Quebrada. This is a small outcropping of pink calcalalino granite. Radiometric dating places it in the Upper Ordovician-Lower Silurian.

The Silurian-Devonian outcroppings in the Quebrada, and in all the Cordillera Oriental in general, are infrequent and chiefly represented in the Sierras Subandinas Unit (TURNER, 1960). For this reason they were united under the term "undifferentiated." At the base there is a thin seam (10-15 m) of grey-green sandstones with a fine clayey matrix that often englobe large blocks of sandstone and gran-

verdi con matrice fine argillosa che ingloba, spesso, grandi blocchi di arenarie e di graniti, in struttura disorganizzata, frutto della deposizione in ambiente marino di flussi gravitativi e torbiditici. Si continua verso l'alto con un potente membro prevalentemente argilloso (500 m di spessore), con intercalazioni arenacee. Infine, la serie silurico-devoniana termina con arenarie quarzitiche alternate a conglomerati, i soli presenti al tetto, il tutto a testimoniare la probabile progradazione di un sistema deltizio.

Il Carbonifero è rappresentato dalle Formaciones Macharetí e Mandiyutí (MATHER, 1922; AMENGUAL & ZANETTINI, 1974), in discordanza angolare sul Devoniano. La prima è costituita da arenarie con intercalazioni pelitiche e scarsi livelli di conglomerati. La seconda presenta diamictiti scure intercalate a conglomerati, arenarie e argille nerastre. Anche queste formazioni sono interpretate, come la precedente, come un sistema deltizio progradante; l'abbondanza di ciottoli striati, inglobati nelle diamictiti, suggerisce che il bacino sedimentario fosse alimentato da un fronte glaciale. Lo spessore massimo è di circa 700 m.

Le formazioni mesozoiche più antiche sono del Cretaceo inferiore: in particolare la Formación Fundición (AMENGUAL & ZANETTINI, 1974) affiora in un'area ristretta a Sud del Rio Yacoraite ed è costituita da sieniti e monzosieniti che, intruse nel Grupo Mesón, hanno prodotto un metamorfismo di contatto in tali sedimenti cambriani.

È sempre del Cretaceo inferiore la Formación Aguilar, la più importante dal punto di vista economico di tutta l'Argentina, per le mineralizzazioni di Pb e Zn (SPENCER, 1950; BRODTKORB *et alii*, 1978; SUREDA & MARTIN, 1990a; 1990b; GEMMELL *et alii*, 1992; MARTIN *et alii*, 1984). Si tratta di un corpo plutonico granitico che affiora ad ovest di Humahuaca, oggetto di coltivazione mineraria (Mina Aguilar).

Il ciclo sedimentario mesozoico-terziario (Cretaceo-Paleogene) è noto con il nome di Grupo Salta (BRACKEBUSCH, 1891; TURNER, 1959) e comprende, dal basso verso l'alto, i sottogruppi Pirgua (VILELA, 1951; REYES & SALFITY, 1973), Balbuena (TURNER, 1959; MORENO, 1970) e S.ta Barbara (MORENO, 1970). I sedimenti di questo Gruppo, quasi totalmente continentali, costituiscono i depositi di una fase di rift intracratonico (GRIER, 1990), alla quale è collegata - nell'area in esame - la messa in posto dei graniti delle formazioni precedentemente descritte (Fundición e Aguilar). Lo spessore complessivo del Grupo Salta si aggira intorno ai 2600 m.

Dello stesso ambiente deposizionale (sistema fluviale tipo braided) sono le successive Formación Casagrande (FERNANDEZ *et alii*, 1973; COIRA, 1979), costituita da una sequenza di oltre 500 m di conglomerati, arenarie ed argille, di età riferita all'Eocene medio (BOND & LOPEZ, 1995) e la Formación Río Grande (PASCUAL *et alii*, 1978), del Miocene, che giace in discordanza sulla precedente ed è costituita da circa 1000 metri di conglomerati e arenarie con rari livelli pelitici.

Segue la Formación Maimará (SALFITY *et alii*, 1984b), limitata al settore centrale della Quebrada. Costituita da arenarie e conglomerati con matrice argillosa, presenta uno spessore compreso tra 35 e 120

ite, in un unorganized structure, the result of the sedimentation of gravitative and turbiditic flows in a marine environment. Continuing upwards, there is a thick, prevalently clayey member (500 m thick), with arenaceous intercalations. Finally, the Silurian-Devonian series ends with quartzitic sandstones alternating with conglomerates, the only rock type present at the roof, all attesting to the probable progradation of a delta system.

The Carboniferous is represented by the Formaciones Macharetí and Mandiyutí (MATHER, 1922; AMENGUAL & ZANETTINI, 1974), in angular unconformity on the Devonian. The former is made up of sandstones with pelitic intercalations and a few seams of conglomerates. The latter shows dark diamictites intercalated with conglomerates, sandstones and blackish clays. Like the preceding formation, these formations are also interpreted as a prograding delta system; the abundance of striated pebbles, englobed in the diamictites, suggests that the sedimentary basin was fed by a glacier front. The maximum thickness is about 700 m.

The oldest Mesozoic formations are from the Lower Cretaceous: in particular, the Formación Fundición (AMENGUAL & ZANETTINI, 1974) outcrops in a limited area south of the Rio Yacoraite and consists of syenites and monzosyenites which, as intrusions in the Grupo Mesón, have produced a contact metamorphism in these Cambrian sediments.

Also from the Lower Cretaceous is the Formación Aguilar, the most important in all of Argentina from an economic viewpoint, for its lead and zinc deposits (SPENCER, 1950; BRODTKORB *et alii*, 1978; SUREDA & MARTIN, 1990a; 1990b; GEMMELL *et alii*, 1992; MARTIN *et alii*, 1984). This is a plutonic granite body that outcrops west of Humahuaca, and is exploited for mining (Mina Aguilar).

The Mesozoic-Tertiary sedimentary cycle (Cretaceous-Paleogene) is known by the name of Grupo Salta (BRACKEBUSCH, 1891; TURNER, 1959) and includes, from the bottom toward the top, the subgroups Pirgua (VILELA, 1951; REYES & SALFITY, 1973), Balbuena (TURNER, 1959; MORENO, 1970) and Santa Barbara (MORENO, 1970). The sediments of this Group, almost entirely continental, constitute the deposits of an intracratonic rift stage (GRIER, 1990), to which is linked - in the area being examined - the origin of the granites in the formations described previously (Fundición and Aguilar). The total thickness of the Grupo Salta is around 2600 m.

The following are from the same sedimentary environment (braided river system): the Formación Casagrande (FERNANDEZ *et alii*, 1973; COIRA, 1979), made up of a sequence of over 500 m of conglomerates, sandstones and clays, dated to the Middle Eocene (BOND & LOPEZ, 1995), and the Formación Río Grande (PASCUAL *et alii*, 1978), from the Miocene, which lies in disconformity to the preceding formation and consists of about 1000 meters of conglomerates and sandstones with rare pelitic seams.

These are followed by the Formación Maimará (SALFITY *et alii*, 1984b), limited to the central section of the Quebrada. Made up of sandstones and conglomerates with an argillaceous matrix, it has a thickness varying from 35 to 120 m. The facies is that of ancient syn-

m. La facies è quella di antichi conoidi alluvionali sintettonici, depositatisi durante la fase di compressione andina. È in eteropia di facies, verso nord-ovest, con la Formación Uquía (CASTELLANOS, 1950), costituita da circa 70-100 m di sabbie giallastre, con intercalazioni di conglomerati, in facies più schiettamente fluviale (braided) rispetto alla precedente, con la quale si interdigita. Entrambe le formazioni suddette si estendono dal Miocene al Pliocene.

Nello schema geologico di Fig. 4 sono stati riuniti in un'unica unità (17) i sedimenti antichi di conoide, quaternari, che rappresentano il prodotto dell'evoluzione morfologica recente della Quebrada e che si trovano in grande quantità soprattutto all'interno della depressione di Humahuaca. Si tratta di depositi multisequenziali di conoide, costituiti da ghiaie con massi inglobati, con struttura stratificata e intercalazioni decimetriche di scorie vulcaniche.

La Formación Purmamarca (SEGEMAR, 1998) riveste, invece, più un significato morfologico che cronostratigrafico, in quanto, pur essendo rappresentata, dal punto di vista litologico, dallo stesso materiale di conoide e fluviale indicato in carta con l'unità 17 (Fig. 4), rappresenta un livello di riferimento morfologico di importanza locale ed è specialmente presente nella Quebrada de Purmamarca. Presenta uno spessore di circa 100 m di ghiaie con blocchi inglobati di filladi e tilliti provenienti, per la maggior parte, dalla Formación Puncoviscana che affiora nell'area. Le strutture presenti (embriciatura, solo occasionalmente stratificazioni incrociate e planari, ma soprattutto lo scarso sorting generalizzato) la identificano principalmente come un deposito prodotto da flussi densi e debris flows e, secondariamente, da attività fluviale più schietta, collegata alle condizioni climatiche periglaciali del Pleistocene (CHAYLE & WAYNE, 1995).

I campi di dune segnalati si riferiscono, invece, ad accumuli eolici presenti nella Puna, ad ovest della Quebrada. Si tratta di sabbie eoliche che determinano evidenti allineamenti di dune longitudinali e barcane.

Sotto il termine di Quaternario indifferenziato sono stati inseriti, infine, tutti i depositi più recenti (Pleistocene-Olocene) di origine prevalentemente fluviale (ghiaie, sabbie, ultima generazione di conoidi alluvionali, sedimenti terrazzati più recenti della Quebrada).

CARATTERI STRUTTURALI E TETTONICI

L'assetto morfostrutturale attuale del bacino della Quebrada de Humahuaca è frutto delle fasi tettoniche che hanno interessato quest'area della Cordillera (BALDIS *et alii*, 1975; MÉNDEZ *et alii*, 1979; CHAYLE *et alii*, 1990; MON & SALFITY, 1995; SEGEMAR, 1998). Si riconoscono, infatti, strutture attribuibili a varie fasi, anche antiche, come quella Tilcarica, cambriana (TURNER & MENDEZ, 1975) e quella Oclóyica, ordoviciana (ACEÑOLAZA & TOSELLI, 1973).

La Fase Cháñica, del Paleozoico superiore (AZCUY & CAMINOS, 1986), più evidente nelle aree limitrofe alla Quebrada, non ha lasciato tracce importanti nelle Unità qui presenti.

Le strutture più evidenti, invece, sono riferibili da una parte allo sviluppo del rift intracratonico cretaceo, dall'altra alla tettonica andina, di tipo compressivo, la cui evoluzione inizia nel Terziario.

tectonic alluvial fans, deposited during the Andine compression stage. It is heteropic, toward the northwest, with the Formación Uquía (CASTELLANOS, 1950), made up of roughly 70-100 m of yellowish sands, with intercalations of conglomerates, in facies more distinctly fluvial (braided) compared to the preceding formation, with which it interdigitates. Both of the above formations extend from the Miocene to the Pliocene.

The geologic diagram in Fig. 4 puts into a single unit (17) the ancient fan sediments, which are from the Quaternary and represent the product of the recent morphological evolution of the Quebrada and are found in great quantities, especially in the Humahuaca depression. These are multisequential fan deposits, made up of gravels with englobed boulders, with a stratified structure and decimetric intercalations of volcanic scoriae.

The Formación Purmamarca (SEGEMAR, 1998) instead is more significant morphologically than chronostratigraphically, given that although it is represented, from a lithological viewpoint, by the same fan and fluvial material indicated by Unit 17 on the map (Fig. 4), it represents a seam of morphological reference that is locally important, and it is especially present in the Quebrada de Purmamarca. It has a thickness of about 100 m of gravels with englobed blocks of phyllades and tillites coming, for the most part, from the Formación Puncoviscana that outcrops in the area. The structures present (imbrication; only occasionally planar and cross-bedding; but above all the generalized scarce sorting) identify it mainly as a deposit produced by dense flows and debris flows and, secondarily, by more direct river activity, connected with the periglacial climatic conditions of the Pleistocene (CHAYLE & WAYNE, 1995).

The dune fields indicated refer instead to the aeolian accumulations present in the Puna, west of the Quebrada. These are aeolian sands that bring about evident alignments of longitudinal and barchan dunes.

Lastly, the more recent deposits (Pleistocene-Holocene) of prevalently fluvial origin (gravels, sands, latest generation of alluvial fans, most recent terraced sediments of the Quebrada) were all entered under the term "undifferentiated Quaternary."

STRUCTURAL AND TECTONIC CHARACTERISTICS

The current morphostructural conformation of the Quebrada de Humahuaca basin is the result of tectonic stages involving this area of the Cordillera (BALDIS *et alii*, 1975; MÉNDEZ *et alii*, 1979; CHAYLE *et alii*, 1990; MON & SALFITY, 1995; SEGEMAR, 1998). Structures attributable to various stages can in fact be recognized, such as the Cambrian Tilcarica (TURNER & MENDEZ, 1975) and the Ordovician Oclóyica (ACEÑOLAZA & TOSELLI, 1973).

The Cháñica Stage, from the Upper Paleozoic (AZCUY & CAMINOS, 1986), more evident in the neighboring areas of the Quebrada, did not leave significant traces in the units here present.

The most evident structures, instead, are referable on the one hand to a part of the development of the Cretaceous intracratonic rift, and on the other to Andine tectonics, which are compressive and

La fase distensiva è caratterizzata dallo sviluppo di un rift intracratonico che produce, oltre alla sedimentazione del Grupo Salta e alla messa in posto dei plutoni granitici delle formazioni Aguilar e Fundición, un sistema di faglie dirette con direzione prevalente N-S o NNE-SSW. I piani di alcune di queste faglie saranno poi riattivati, con componente inversa, durante la fase compressiva.

In generale, la fine del processo distensivo viene datata all'Eocene medio, con la comparsa dei primi eventi compressivi che caratterizzano la Fase Incaica I (STEINMANN, 1930) e, in maggior misura, la Fase Incaica II, al passaggio Eocene-Oligocene (FRUTOS, 1981). Si susseguono altre fasi tettoniche, sempre di tipo compressivo: la Fase Pehuenche (YRIGOYEN, 1979), al passaggio Oligocene-Miocene; la Quechúa Inicial (STEINMANN, 1930), nel Miocene medio; la Quechúa Principal (YRIGOYEN, 1979), al limite Miocene-Pliocene e, infine, la Fase Diaguita, così definita sempre da YRIGOYEN (1979), datata tra il Pliocene ed il Pleistocene.

Numerosi lavori sulla tettonica compressiva andina nel Nord-Ovest argentino (tra i principali: BOLL & HERNANDEZ, 1986; BIANUCCI *et alii*, 1987; ARAMAYO FLOREZ, 1989; HERNANDEZ *et alii*, 1991; STARCK *et alii*, 1992) evidenziano correlazioni tra eventi tettonici e sedimentazione sinorogenica. In tale ottica trovano ragion d'essere, per esempio, la Formación Casagrande, contemporanea alla Fase Incaica I e la successiva Formación Rio Grande, contemporanea alla Fase Incaica II, come pure alcune formazioni più recenti (Maimará e Uquía), sinorogeniche con l'ultima fase tettonica (Diaguita).

Gran parte delle faglie inverse collegate a tali fasi si presentano in superficie ad alto angolo, anche se è molto probabile che abbiano una geometria listrica in profondità, unendosi in una superficie di scollamento comune, rappresentata dal basamento precambriaco a circa 20 km di profondità. Ciò sarebbe in accordo con quanto descritto da MINGRAMM (1982), BIANUCCI *et alii* (1987), ARAMAYO FLOREZ (1989), CLADOUHOS (1993), KLEY & REINHARDT (1993) e ALLMENDINGER & ZAPATA (1996) per sezioni vicine, situate appena a nord dell'area di interesse. Secondo tale interpretazione, tale geometria risulterebbe, infatti, del sistema di faglie distensivo del Mesozoico: i piani delle faglie inverse costituirebbero una riattivazione delle più vecchie faglie dirette, create dal rift intracratonico cretaceo.

La vergenza dominante è orientale, anche se sono frequenti strutture con vergenza opposta, specialmente nel settore occidentale (Fig. 4). Queste ultime possono essere interpretate come retroscorrimenti.

CARATTERISTICHE CLIMATICHE

Il clima della regione della Quebrada de Humahuaca può essere considerato, in generale, di carattere continentale arido, con scarse precipitazioni distribuite in estate e una stagione invernale molto secca (BWKCw secondo la classificazione di Koppen).

Il regime pluviometrico risente essenzialmente dell'altitudine e della esposizione dei versanti alle masse d'aria umida di provenienza atlantica. Le precipitazioni, infatti, sono di tipo orografico: tali masse

which began to develop in the Tertiary.

The distensive stage is characterized by the development of an intracratonic rift that produces, along with the sedimentation of the Grupo Salta and the intrusion of the granitic plutons of the Aguilar and Fundición formations, a system of normal faults striking mainly N-S or NNE-SSW. The planes of some of these faults would later be reactivated, with an inverse component, during the compressive stage.

In general, the end of the distensive process is dated to the Middle Eocene, with the appearance of the first compressive events that characterize the Incaica I Stage (STEINMANN, 1930) and, to a greater degree, the Incaica II Stage, at the Eocene-Oligocene transition (FRUTOS, 1981). Other tectonic stages followed, still compressive: the Pehuenche Stage (YRIGOYEN, 1979), at the Oligocene-Miocene transition; the Quechúa Inicial (STEINMANN, 1930), in the Middle Miocene; the Quechúa Principal (YRIGOYEN, 1979), at the Miocene-Pliocene boundary and, lastly, the Diaguita Stage, thus defined again by YRIGOYEN (1979), dated between the Pliocene and Pleistocene.

Numerous works on Andine compressive tectonics in northwestern Argentina (among the main works are: BOLL & HERNANDEZ, 1986; BIANUCCI *et alii*, 1987; ARAMAYO FLOREZ, 1989; HERNANDEZ *et alii*, 1991; STARCK *et alii*, 1992) indicate the correlations between tectonic events and synorogenic sedimentation. This would explain, for example, the Formación Casagrande, contemporary with the Incaica I Stage and the subsequent Formación Rio Grande, contemporary with the Incaica II Stage, as well as some more recent formations (Maimará and Uquía), synorogenic with the last tectonic stage (Diaguita).

A large part of the reverse faults connected with these stages appear at the surface at a high angle, although it is very probable that they have a listric geometry at depth, uniting with each other in a common décollement surface, represented by the Precambrian basement at a depth of approximately 20 km. This would agree with that described by MINGRAMM (1982), BIANUCCI *et alii* (1987), ARAMAYO FLOREZ (1989), CLADOUHOS (1993), KLEY & REINHARDT (1993) e ALLMENDINGER & ZAPATA (1996) for nearby sections, located just north of the area being investigated. According to this interpretation, this geometry would in fact show the effects of the system of Mesozoic distensive faults: the reverse fault planes would constitute a reactivation of the older normal faults created by the Cretaceous intracratonic rift.

The dominant vergence is eastward, although there are frequent structures with opposing vergences, especially in the western section (Fig. 4). These latter structures can be interpreted as backthrusts.

CLIMATIC CHARACTERISTICS

The Quebrada de Humahuaca region can generally be considered to have an arid continental climate, with infrequent precipitation in the summer and a very dry winter season (BWKCw according to the Koppen classification).

The rainfall regime is influenced essentially by the altitude and by the exposure of the slopes to humid air masses coming from the Atlantic. Precipitation is in fact of an orographic type: when meeting

d'aria, incontrando i rilievi della Cordillera Oriental, sono costrette a risalire, raffreddandosi e producendo intense precipitazioni soprattutto nei versanti orientali. Raggiunta quota 2500-3000 m s.l.m., hanno ormai ceduto gran parte della loro umidità. Ciò spiega, da un lato, l'aridità dell'Altopiano della Puna, situato più ad Ovest, oltre la Cordillera Oriental; dall'altro lato la presenza di potenti spessori di suolo, dove prospera la foresta tropicale di alta quota, nel settore orientale della Cordillera, esposto a precipitazioni che superano i 1000 mm/anno (SEGEMAR, 1998).

Le informazioni ed i dati meteorologici consultati sono stati registrati da vari Enti (Servicio Meteorológico Nacional, Dirección de Hidráulica de Jujuy, Ferrocarril General Manuel Belgrano). Più completi sono i dati relativi alle precipitazioni, che permettono di calcolare con buona attendibilità i valori medi, mentre più lacunosi e rari sono quelli relativi al regime termico.

Nelle tabelle 1 e 2 sono riportate le caratteristiche delle stazioni pluviometriche e termopluviometriche prese in considerazione, insieme con i valori dei parametri climatici più significativi, ricavabili dai dati a disposizione (SECRETARÍA DE MINERÍA DE LA NACIÓN, REPÚBLICA ARGENTINA, sito web istituzionale). La distribuzione e l'ubicazione delle stazioni sono riportate in Fig. 3.

In effetti, i dati proposti evidenziano alcune differenze significative all'interno della Quebrada de Humahuaca.

Già GARCIA (1990), classificando il clima dell'Argentina in cinque province climatiche, inserisce l'area della Quebrada all'interno della "provincia andina", caratterizzata da clima tipico di montagna e alta montagna, molto secco a Nord del Tropico del Capricorno e più umido, fino a molto umido, a Sud di tale parallelo. Considerato lo sviluppo meridiano del bacino e l'ubicazione del Tropico, che attraversa la Quebrada proprio nella sua porzione mediana, nelle vicinanze di Huacalera, si può facilmente intuire come le caratteristiche climatiche possano presentare differenze non trascurabili all'interno del bacino (BIANCHI & YANEZ, 1992; CENCETTI *et alii*, 2001).

Si possono distinguere, pertanto, tre aree climatiche:

- l'area della Puna (in cui è compresa l'estrema porzione settentrionale del bacino), caratterizzata da clima arido, assenza di vegetazione, precipitazioni medie annue comprese tra 200 e 300 mm annui e bassa umidità relativa. Anche le temperature medie sono basse, con picchi molto freddi, ma si registrano forti escursioni termiche (cfr. al proposito, la stazione di Abra Pampa in Tab. 2), dovute alla forte insolazione delle ore diurne a cui fa seguito un'altrettanto forte irradiazione notturna, causata essenzialmente dalle quote elevate e dalla presenza di venti freschi;
- l'area della Cordillera Oriental, dove la Quebrada presenta il suo massimo sviluppo, in cui il clima dominante è di tipo semi-arido, con temperature medie più alte (cfr. stazioni di Humahuaca e Vivero Hornillos, sempre in Tab. 2) ed escursioni termiche più contenute, anche se ancora sicuramente importanti. Le precipitazioni annuali, calcolate in molte stazioni nell'arco di oltre 50 anni (Tab. 1), sono mediamente pari a circa 250 mm e sono concen-

trando i rilievi della Cordillera Oriental, le masse d'aria sono costrette a risalire, causando loro il raffreddamento e la produzione di intense precipitazioni specialmente sui versanti orientali. Raggiunta quota 2500-3000 metri a.s.l., hanno ormai ceduto gran parte della loro umidità. Ciò spiega, da un lato, l'aridità dell'Altopiano della Puna, situato più ad Ovest, oltre la Cordillera Oriental; dall'altro lato la presenza di spessori di suolo molto elevati, dove prospera la foresta tropicale di alta quota, nel settore orientale della Cordillera, esposto a precipitazioni che superano i 1000 mm/anno (SEGEMAR, 1998).

Le informazioni ed i dati meteorologici consultati sono stati registrati da vari Enti (Servicio Meteorológico Nacional, Dirección de Hidráulica de Jujuy, Ferrocarril General Manuel Belgrano). I dati più completi riguardano le precipitazioni, che permettono di calcolare con buona attendibilità i valori medi, mentre più lacunosi e rari sono quelli relativi al regime termico.

Nelle tabelle 1 e 2 sono riportate le caratteristiche delle stazioni pluviometriche e termopluviometriche prese in considerazione, insieme con i valori dei parametri climatici più significativi, ricavabili dai dati a disposizione (SECRETARÍA DE MINERÍA DE LA NACIÓN, REPÚBLICA ARGENTINA, sito web istituzionale). La distribuzione e l'ubicazione delle stazioni sono riportate in Fig. 3.

In effetti, i dati proposti evidenziano alcune differenze significative all'interno della Quebrada de Humahuaca.

Già GARCIA (1990), classificando il clima dell'Argentina in cinque province climatiche, inserisce l'area della Quebrada all'interno della "provincia andina", caratterizzata da clima tipico di montagna e alta montagna, molto secco a Nord del Tropico del Capricorno e più umido, fino a molto umido, a Sud di tale parallelo. Considerato lo sviluppo meridiano del bacino e l'ubicazione del Tropico, che attraversa la Quebrada proprio nella sua porzione mediana, nelle vicinanze di Huacalera, si può facilmente intuire come le caratteristiche climatiche possano presentare differenze non trascurabili all'interno del bacino (BIANCHI & YANEZ, 1992; CENCETTI *et alii*, 2001).

Si possono distinguere, pertanto, tre aree climatiche:

- l'area della Puna (in cui è compresa l'estrema porzione settentrionale del bacino), caratterizzata da clima arido, assenza di vegetazione, precipitazioni medie annue comprese tra 200 e 300 mm annui e bassa umidità relativa. Anche le temperature medie sono basse, con picchi molto freddi, ma si registrano forti escursioni termiche (cfr. al proposito, la stazione di Abra Pampa in Tab. 2), dovute alla forte insolazione delle ore diurne a cui fa seguito un'altrettanto forte irradiazione notturna, causata essenzialmente dalle quote elevate e dalla presenza di venti freschi;
- l'area della Cordillera Oriental, dove la Quebrada presenta il suo massimo sviluppo, in cui il clima dominante è di tipo semi-arido, con temperature medie più alte (cfr. stazioni di Humahuaca e Vivero Hornillos, sempre in Tab. 2) ed escursioni termiche più contenute, anche se ancora sicuramente importanti. Le precipitazioni annuali, calcolate in molte stazioni nell'arco di oltre 50 anni (Tab. 1), sono mediamente pari a circa 250 mm e sono concen-

RIVER DYNAMICS IN THE CORDILLERA ORIENTAL OF THE ANDES (NORTHWESTERN ARGENTINA)

Rainfall Station	Longitude (Gauss-Boaga)	Latitude (Gauss-Boaga)	Altitude (m a.s.l.)	Period of measurements	Boureau	Av. Rainfall (mm/year)
Termas de Reyes	65°29'	24°10'	1800	1934-1990	Servicio Meteorologico Nacional	1512
Yala	65°24'	24°07'	1445	1934-1990	Servicio Meteorologico Nacional	843
Los Nogales - Rio Yala	65°27'	24°07'	1617	1934-1990	Servicio Meteorologico Nacional	1258
Leon	65°26'	24°02'	1622	1934-1990	Servicio Meteorologico Nacional	870
Volcan	65°28'	23°55'	2078	1934-1990	Ferrocarril Gral. Manuel Belgrano	392
Tumbaya	65°28'	23°51'	2094	1934-1990	Ferrocarril Gral. Manuel Belgrano	199
Vivero Hornillos	65°26'	23°40'	2370	1962-1968	Servicio Meteorologico Nacional	134
Maimará	65°24'	23°37'	2334	1934-1981 1985-1990	Ferrocarril Gral. Manuel Belgrano	121
Tilcara	65°23'	23°34'	2461	1934-1990	Ferrocarril Gral. Manuel Belgrano	136
Huacalera	65°21'	23°26'	2462	1934-1990	Ferrocarril Gral. Manuel Belgrano	159
Uquia	65°21'	23°17'	2818	1934-1990	Ferrocarril Gral. Manuel Belgrano	153
Cianzo	65°13'	23°14'	3415	1971-1990	Direccion de Hidraulica de Jujuy	405
Humahuaca	65°23'	23°12'	2939	1934-1990	Ferrocarril Gral. Manuel Belgrano	174
El Aguilar	65°42'	23°12'	4700	1969-1988	Direccion de Hidraulica de Jujuy	386
Abra Laite	65°47'	23°11'	3620	1972-1973 1979-1990	Direccion de Hidraulica de Jujuy	349
Coctaca	65°17'	23°08'	3573	1971-1978 1981-1990	Direccion de Hidraulica de Jujuy	306
Palca de Aparzo	65°06'	23°07'	3550	1971-1990	Direccion de Hidraulica de Jujuy	353
Iturbe	65°21'	22°58'	3343	1934-1990	Ferrocarril Gral. Manuel Belgrano	253
Tres Cruces	65°34'	22°55'	3693	1934-1990	Ferrocarril Gral. Manuel Belgrano	229
Abra Pampa	65°42'	22°48'	3484	1935-1990	Ferrocarril Gral. Manuel Belgrano	282

Tab. 1 - Caratteristiche principali delle stazioni pluviometriche presenti nel bacino della Quebrada de Humahuaca e dati relativi alle precipitazioni
- *Main features of the rainfall measurement stations in the Quebrada de Humahuaca watershed and related data*

Thermometric Station	Absolute T max (°C)	Average T max (°C)	Average T (°C)	Average T min (°C)	Absolute T min (°C)	Relative Humidity (%)	Period of measurements
Vivero Hornillos	-	-	13,8	-	-	60	1962-1968
Humahuaca	31,9	22,5	12	2,9	-13,9	53	1961-1970
Abra Pampa	27	18,5	8,7	-2,4	-22	49	1981-1990

Tab. 2 - Principali caratteristiche termometriche relative alle stazioni di misura dislocate lungo la Quebrada de Humahuaca
Main thermometric characteristics of the measurement stations along the Quebrada de Humahuaca

trate prevalentemente nei mesi estivi (da novembre a marzo si registra circa l'80% delle precipitazioni totali). La stazione che in assoluto registra i minimi afflussi meteorici è Maimará, con un valore delle precipitazioni medie annue pari a 121 mm/anno;

- l'area meridionale del bacino, situata a Sud di Volcán, dove l'elemento principale da evidenziare è l'aumento progressivo, ma molto rapido, del valore delle precipitazioni medie annue, che raggiungono il massimo valore registrato (1512 mm/anno) a Termas de Reyes, la stazione situata a quota minore tra quelle considerate (1800 m.s.l.m.).

I grafici di Figg. 5 e 6 evidenziano quanto appena descritto in merito alla distribuzione delle precipitazioni. In entrambi sono riportate le stazioni prese in considerazione: nel primo grafico queste sono disposte in base alla quota (da sinistra verso destra), mentre nel secondo le stes-

months (about 80% of the total precipitation is recorded from November to March). The station recording the absolute minimum precipitation is Maimará, with an average annual precipitation value of 121 mm/year;

- the southern area of the basin, situated south of Volcán, where the main element to be pointed out is the progressive but very sharp increase in the average annual precipitations, which reach the maximum value recorded (1512 mm/year) at Termas de Reyes, the station at the lowest elevation among those considered (1800 m a.s.l.).

The graphs in Figures 5 and 6 represent the preceding description in regard to precipitation. Both give the stations taken into consideration: in the first graph they are ordered according to elevation (from left to right), whereas in the second they are ordered according to

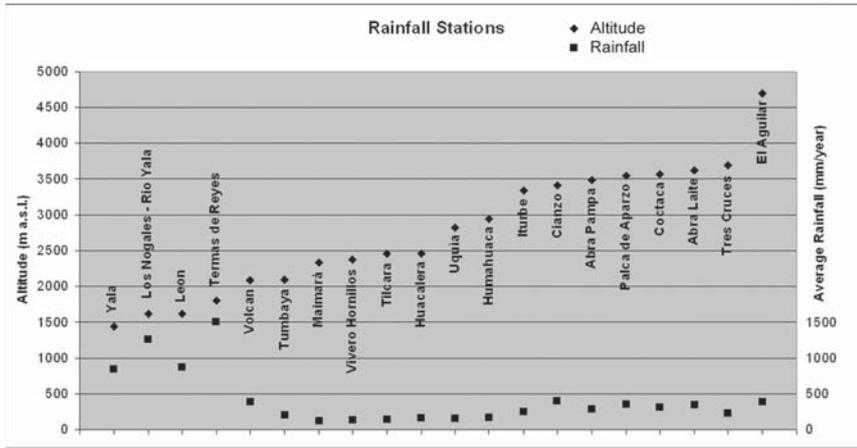


Fig. 5 - Afflussi medi annui registrati dalle stazioni pluviometriche presenti nella Quebrada de Humahuaca, ordinate in base alla quota s.l.m.
- Average annual rainfalls recorded by the pluviometric stations in the Quebrada de Humahuaca, sorted by altitude a.s.l.

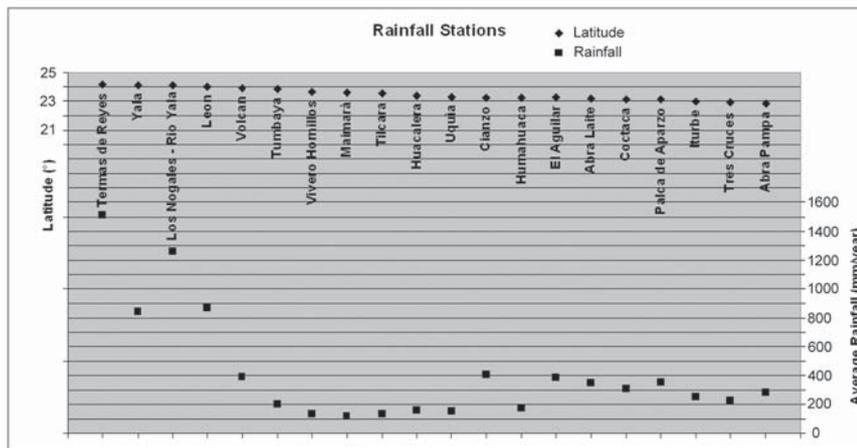


Fig. 6 - Afflussi medi annui registrati dalle stazioni pluviometriche presenti nella Quebrada de Humahuaca, ordinate in base alla loro latitudine
- Average annual rainfalls recorded by the pluviometric stations in the Quebrada de Humahuaca, sorted by latitude

se sono ordinate in base alla loro latitudine, decrescente verso destra (in pratica dalle più meridionali alle più settentrionali). Gli stessi grafici dimostrano che quattro stazioni (Yala, Los Nogales-Rio Yala, Leon e Termas de Reyes, cioè quelle situate a quota minore ed alle latitudini più meridionali) si distinguono nettamente dalle altre per il valore più alto di afflussi meteorici annui, evidenziando una soglia climatica molto precisa, disposta in senso E-W, situata in prossimità della latitudine di Volcán.

Proprio in base a tali caratteristiche climatiche e prendendo in considerazione anche gli elementi vegetazionali del bacino, CHAYLE & AGÜERO (1987) hanno distinto, anche se grossolanamente, due zone nettamente differenti, situate rispettivamente a Nord e a Sud di Tilcara:

- 1) quella settentrionale, caratterizzata dall'assenza di vegetazione o, al massimo, man mano che si procede verso Sud e si arriva al di sotto dei 3000 m s.l.m., da vegetazione di tipo xerofilo (essenzialmente Cactacee), con precipitazioni scarse ed escursione termica giornaliera più elevata;
- 2) quella meridionale, con valori di precipitazioni maggiori ed escursione termica ridotta e, conseguentemente, vegetazione più abbondante, fino ad arrivare addirittura a caratteristiche climatiche di tipo tropicale umido.

their latitude, decreasing toward the right (basically from the southernmost to the northernmost). These graphs show that four stations (Yala, Los Nogales-Rio Yala, Leon and Termas de Reyes, i.e. those located at the lowest altitudes and southernmost latitudes) are distinctly differentiated from the others for their higher annual rainfalls, delineating a very precise climatic threshold, running E-W, located near the latitude of Volcán.

On the basis of these climatic characteristics and taking into consideration also the vegetation in the basin, CHAYLE & AGÜERO (1987) have identified, though somewhat roughly, two distinctly different zones, situated north and south of Tilcara:

- 1) the northern zone, characterized by the absence of vegetation or, at most, moving slowly southward and arriving below 3000 meters a.s.l., by xerophilous-type vegetation (essentially Cactaceae), with little precipitation and a higher daily temperature range;
- 2) the southern zone, with higher precipitation values and a lower temperature range and, consequently, more abundant vegetation, finally arriving at wet tropical-type climatic characteristics. Nonetheless, the greatest problems are created, as better

Tuttavia, è soprattutto la distribuzione temporale delle precipitazioni, concentrata in brevi periodi dell'anno (soprattutto quelli estivi) e caratterizzata da eventi meteorici particolarmente intensi a creare, come meglio descritto in seguito, i maggiori problemi. I risultati di tali episodi, spesso catastrofici, sono un'intensa degradazione dei versanti e la presenza di ingenti fenomeni di trasporto solido (HARRINGTON, 1943; CENCETTI *et alii*, 2004).

CARATTERISTICHE GEOMORFOLOGICHE GENERALI

La Quebrada de Humahuaca costituisce l'area di testata del Rio Grande de Jujuy. Tale fiume, di tipo braided, che fa parte del più ampio bacino del Rio Bermejo (Fig. 1), nasce dalla confluenza tra due corsi d'acqua (Fig. 3): quello con andamento meridiano situato a Nord del villaggio di Iturbe (Arroyo de la Cueva) e quello con direzione E-W situato a Sud del villaggio di Tres Cruces.

L'area del bacino, fino alla sua confluenza con il Rio S. Francisco, è di circa 7250 km², mentre la somma cumulata delle lunghezze dei corsi d'acqua che lo compongono è di circa 1900 km. Ne consegue una densità di drenaggio relativamente bassa (0,26 km⁻¹).

La Quebrada è la valle principale della Cordillera Oriental; la sua orientazione in senso N-S ed il reticolo idrografico evidenziano il forte controllo da parte delle unità tettonico-strutturali presenti (pieghe e faglie). A conferma di quanto detto, è sufficiente osservare le direzioni preferenziali delle aste fluviali a Nord di Volcán che, con il loro pattern rettangolare, manifestano chiaramente la presenza di lineazioni tettoniche che controllano il deflusso superficiale (SEGEMAR, 1998).

Il collettore principale corre addossato allo spartiacque orientale, come conseguenza di una netta asimmetria del reticolo stesso, in cui gli affluenti di destra presentano uno sviluppo maggiore, contribuendo in maniera quasi esclusiva alle portate liquide registrate nel Rio Grande.

A proposito del regime idrologico della Quebrada, va segnalato che non esistono serie temporali di misure di portata liquida del Rio Grande e dei suoi affluenti, ma solo misure occasionali che dimostrano, in ogni caso, come l'aridità del clima e le caratteristiche litologiche del substrato siano tali da generare normalmente bassi valori di portata. Tuttavia, come sempre succede nei fiumi con caratteristiche braided, in presenza di eventi meteorici improvvisi si possono registrare portate sensibilmente più elevate.

Alcune misure di portata considerate significative, tra le poche effettuate in maniera puntuale, sia in senso spaziale che temporale, sul Rio Grande e sui suoi maggiori affluenti dagli Enti preposti (essenzialmente due: il Consejo Federal de Inversiones e il SEGEMAR), sono riportate in Tab. 3.

Dalle misure effettuate nel maggio 1989 si può dedurre, anche se in via cautelativa, data la scarsità dei dati a disposizione, che:

- il Rio Grande non subisce incrementi significativi di portata durante il suo primo tratto (da Iturbe a Humahuaca). Sembra, al contrario, che l'entità dell'infiltrazione sia tale da far diminuire la sua portata, già esigua. Tale elemento può

descritto in following, above all by the time distribution of the precipitation, which is concentrated in brief periods of the year (especially in summer) and is characterized by particularly intense meteorological events. The products of such often catastrophic episodes, are the intense degradation of the slopes and the occurring of strong solid transport phenomena (HARRINGTON, 1943; CENCETTI *et alii*, 2004).

GENERAL GEOMORPHOLOGICAL CHARACTERISTICS

The Quebrada de Humahuaca constitutes the area of the head of the Rio Grande de Jujuy. This river, which is braided and is part of the larger basin of the Rio Bermejo (Fig. 1), rises from the confluence of two streams (Fig. 3): that flowing south located north of the village of Iturbe (Arroyo de la Cueva) and that flowing E-W located south of the village of Tres Cruces.

The basin's area, up to the river's confluence with the Rio S. Francisco, is approximately 7250 km², and the cumulative sum of the lengths of the rivers and streams it contains is about 1900 km. Its drainage density therefore relatively low (0.26 km⁻¹).

The Quebrada is the main valley of the Cordillera Oriental; its N-S orientation and the channel net are evidence of the strong control by the tectonic-structural units present (folds and faults). As confirmation of this, one need only observe the preferential directions of the rivers north of Volcán, the rectangular pattern of which clearly indicates the presence of tectonic lines that control the surface runoff (SEGEMAR, 1998).

The main course of the river runs against the eastern watershed, as a consequence of the distinct asymmetry in the net, in which the right tributaries are much larger, contributing almost exclusively to the water discharge recorded in the Rio Grande.

As concerns the hydrological regimen of the Quebrada, it should be stated that there are no time series of water discharge measurements for the Rio Grande and its tributaries, but only occasional measurements, which in any event demonstrate how the aridity of the climate and the lithological characteristics of the substratum are such as to normally generate low flow values. Nonetheless, as always happens with braided rivers, considerably higher discharges can be recorded when there are sudden rainfalls.

Table 3 gives some flow measurements considered significant, among the few done occasionally, both spacewise and timewise, taken on the Rio Grande and its major tributaries by the competent Agencies (essentially two: the Consejo Federal de Inversiones and SEGEMAR).

The measurements done in May 1989 make it possible to deduce - though somewhat tentatively, given the scarcity of the data available - that:

- the Rio Grande does not undergo significant increases in water discharge during its initial stretch (from Iturbe to Humahuaca). On the contrary, it would appear that the degree of infiltration is such

River	Discharge measurement station	Date	Discharge (m ³ /s)	Specific Discharge (l/s · km ²)
Rio Grande	Iturbe	May 1999	0,10	0,09
Rio Grande	Upstream Humahuaca	May 1999	0,07	0,05
Rio Yacoraite	10 kms upstream confluence Rio Grande	May 1999	0,48	0,53
Rio Huasamayo	Confluence Rio Grande	May 1999	0,09	0,90
Rio Grande	Downstream confluence Huasamayo	May 1999	1,10	0,26
Rio Purmamarca	Confluence Rio Grande	May 1999	0,10	0,29
Rio Grande	Volcan	November 24, 1987	3,67	0,70
Rio Grande	Volcan	January 30, 1988	85,42	16,37
Rio Grande	Volcan	February 25, 1989	13,54	2,59
Rio Grande	Volcan	March 10, 1989	18,50	3,54
Rio Grande	Volcan	March 11, 1989	8,42	1,61
Rio Grande	Volcan	March 17, 1989	1,78	0,34
Rio Grande	Volcan	March 21, 1989	1,63	0,31

Tab. 3 - Misure puntuali di portata effettuate lungo l'alveo della Quebrada de Humahuaca (fonte: Consejo Federal de Inversiones, Buenos Aires)
- Occasional flow measurements taken along the Quebrada de Humahuaca (source: Consejo Federal de Inversiones, Buenos Aires)

essere spiegato con il fatto che l'alveo del Rio Grande attraversa, nel tratto immediatamente a Nord di Humahuaca (vedi schema geologico di fig. 4, all'estremità settentrionale) un'area in cui è presente un elevato spessore di depositi clastici, tali da far diminuire il deflusso superficiale;

- il Rio Yacoraite è senza dubbio l'affluente più importante in termini di apporti liquidi;
- la portata del Rio Grande, almeno dai dati riportati, appare più che decuplicata alla fine del tratto compreso tra Humahuaca e Tilcara, a valle della confluenza con il Rio Huasamayo. Il Rio Yacoraite senza dubbio contribuisce in maniera determinante a far aumentare la portata registrata nel Rio Grande, ma non è tale da giustificare completamente l'aumento riscontrato. Si esclude che il Rio Huasamayo, data la sua esigua portata, possa contribuire in maniera così importante all'aumento di portata registrato nell'alveo del Rio Grande; si esclude anche, per quanto riguarda l'occasionalità della misura, che tale valore sia influenzato da precipitazioni occorse nel maggio 1989 (i dati pluviometrici indicano l'assenza totale di precipitazioni in questo mese del 1989 in tutte le stazioni pluviometriche della Quebrada); non esistono, infine, altri affluenti importanti in tale tratto, da giustificare apporti superficiali significativi. L'unica spiegazione, pertanto, è che l'aumento di portata avvenga per alimentazione dai versanti per via sotterranea. Tesi tutta da dimostrare, data l'assenza di altri dati significativi che non siano solo questo aumento di portata registrato nell'alveo principale, fatto che comunque non trova spiegazioni esaurienti tramite gli apporti superficiali dai tributari.

Invece, dalle misure effettuate, se pure in tempi diversi, nella stazione di Volcán (vedi sempre tab. 3), si possono trarre le seguenti

as to decrease its flow, which is already slight. This can be explained by the fact that the bed of the Rio Grande crosses, in the stretch immediately north of Humahuaca (see the geologic diagram in Fig. 4, at the north end) an area which has a great thickness of clastic deposits, such as to diminish the surface runoff;

- the Rio Yacoraite is without a doubt the most important tributary in terms of contributing flow;
- the water discharge of the Rio Grande, at least according to the data given, appears to have increased more than tenfold at the end of the stretch between Humahuaca and Tilcara, downstream from the confluence with the Rio Huasamayo. The Rio Yacoraite undoubtedly contributes greatly to increasing the flow recorded in the Rio Grande, but not enough to entirely justify the increase noted. Given its meager flow, the Rio Huasamayo cannot have contributed very significantly to the increase in flow recorded in the Rio Grande; one can also rule out, as regards the occasional nature of the measurements, that this value is influenced by precipitation occurring in May 1989 (the rainfall data indicate a total absence of precipitation during this month in 1989 at all the precipitation stations in the Quebrada); lastly, there are no important tributaries in that stretch that can justify significant surface contributions. The only explanation, therefore, is that the flow increase is due to feeding from groundwater from the mountains. This theory remains to be demonstrated, given the absence of other significant data other than just this increase in discharge recorded in the main river, a fact that in any event is not satisfactorily explained by the surface contributions of the tributaries.

The following conclusions can instead be drawn from the measurements recorded, though at different times, at the Volcán station

conclusioni:

- la portata minima registrata nel Rio Grande all'inizio del periodo autunnale (fine marzo 1989), quindi immediatamente dopo le piogge estive, è pari a 1,63 m³/sec, ed è congruente e confrontabile con le misure discusse precedentemente del maggio 1989;
- la portata massima, registrata in pieno periodo piovoso (fine gennaio), è pari a 85,42 m³/sec, a dimostrazione della variabilità di portate che possono essere registrate nell'alveo del Rio Grande a seguito di un evento intenso ed improvviso, quale con molta probabilità si è verificato in quest'occasione;
- le misure, ravvicinate nel tempo, effettuate tra il 10 marzo e il 21 marzo 1989 mostrano ancora la forte variabilità delle portate che, in un giorno, si sono più che dimezzate, fino a raggiungere progressivamente valori "normali" per il periodo durante i giorni successivi.

Per quanto riguarda altre caratteristiche del reticolo idrografico, va evidenziata la presenza di affluenti spesso poco sviluppati in lunghezza, specialmente in sinistra idrografica, ma dotati di elevata pendenza media e tali così da produrre intensi fenomeni di erosione sui versanti e di trasporto solido. È in questo modo che vengono alimentati gli ampi conoidi alluvionali che si formano in corrispondenza della confluenza tra il Rio Grande ed i suoi tributari. Spesso questi apporti solidi, provenendo da entrambi i versanti, formano conoidi nello stesso tratto del collettore principale, ma da parti opposte e riescono a restringere sensibilmente l'alveo del Rio Grande, quand'anche a provocare occlusioni d'alveo con la formazione di laghi temporanei (TRAUTH & STRECKER, 1999). È quanto avviene, per esempio, nei pressi di Tilcara, dove le confluenze con il Rio Grande del Rio Huasamayo e del Rio Huichaira (rispettivamente affluente in sinistra e in destra - vedi Fig. 3) che si trovano appena a valle dell'abitato, hanno ridotto fortemente la sezione di deflusso del Rio Grande, aumentando considerevolmente il rischio da alluvionamento nell'intera area (BRANDÁN & VIERA, 1996).

Uno degli effetti immediati di tali fenomeni sulla dinamica dell'alveo è la formazione di gradini nel profilo longitudinale del corso d'acqua principale (in pratica livelli di base locali - BRANDÁN *et alii*, 2005). Il più evidente, con effetti veramente macroscopici sulla dinamica fluviale, tanto da far risentire i suoi effetti per molti km a monte, fino alla confluenza tra Rio Grande e la Quebrada de Purmamarca, è quello che si è prodotto in corrispondenza del grande conoide dell'Arroyo del Medio, nei pressi di Volcán (Figg. 7-8), alimentato da debris flows frequenti e disastrosi che hanno causato nel tempo ingenti danni alle vie di comunicazione che corrono lungo la Quebrada (PASTORE & GROEBER, 1936; GONZALES DIAZ & FAUQUE, 1987; IGARZABAL & RIVELLI, 1996; MAAS *et alii*, 1999; CENCETTI *et alii*, 2004).

In questo caso la presenza di sedimenti lacustri a monte del conoide (Fig. 9) è l'indizio di frequenti e continue occlusioni d'alveo. L'ultima, di cui si ha conoscenza storica, è avvenuta nel 1945 (SEGEMAR, 1998); la conseguente incisione artificiale della soglia, costituita dall'enorme corpo sedimentario che occlude il Rio Grande, ha prodotto intensi fenomeni di erosione regressiva da parte del corso d'ac-

(again, see Table 3).

- the minimum discharge recorded in the Rio Grande at the start of the autumn period (late March 1989), and thus immediately after the summer rains, was 1.63 m³/sec, and it is congruent and comparable with the May 1989 measurements discussed previously;
- the maximum discharge, recorded in the middle of the rainy season (late January), was 85.42 m³/sec, demonstrating the variability of the flows that can be recorded in the channel of the Rio Grande following a sudden and intense rainfall, which very probably happened on this occasion;
- the measurements, close in time, done between 10 March and 21 March 1989, show again the great variability in the flows, which in one day decreased by more than half, until progressively reaching values that are "normal" for the period during the subsequent days.

As regards other characteristics of the channel net, mention should be made of the presence of tributaries that are not very long, especially on the hydrographic left, but that have a very high average slope and thus bring about intense erosion and solid transport on the slopes. It is in this way that the large alluvial fans are fed, which form at the confluence between the Rio Grande and its tributaries. Often these solid contributions, coming from both slopes, form fans within the main collector itself, but from opposite sides, and they narrow considerably the channel of the Rio Grande, sometimes also blocking the channel with the formation of temporary lakes (TRAUTH & STRECKER, 1999). This is what happens, for example, near Tilcara, where the confluences with the Rio Grande of the Rio Huasamayo and the Rio Huichaira (on the left and right respectively - see Fig. 3), which are just downstream from the town, have considerably reduced the flow section of the Rio Grande, notably increasing the risk of flooding in the entire area (BRANDÁN & VIERA, 1996).

One of the more immediate effects of these phenomena on the river dynamics is the formation of steps in the longitudinal profile of the main river (local base levels, practically speaking - BRANDÁN *et alii*, 2005). The most evident of these, with truly macroscopic effects on the river dynamics, such that they are felt even many kilometers upstream, up to the confluence between the Rio Grande and the Quebrada de Purmamarca, is that created at the large Arroyo del Medio fan, near Volcán (Fig. 7-8), fed by frequent and disastrous debris flows that have caused immense damage to the roads running along the Quebrada (PASTORE & GROEBER, 1936; GONZALES DIAZ & FAUQUE, 1987; IGARZABAL & RIVELLI, 1996; MAAS *et alii*, 1999; CENCETTI *et alii*, 2004).

In this case the presence of lacustrine sediments upstream from the fan (Fig. 9) provides a clue to the frequent and continuous blockages of the channel. The latest, of which there is historic knowledge, occurred in 1945 (SEGEMAR, 1998); the subsequent artificial incision of the threshold, made up of the enormous body of sediment that blocked the Rio Grande, produced intense regressive erosion phe-

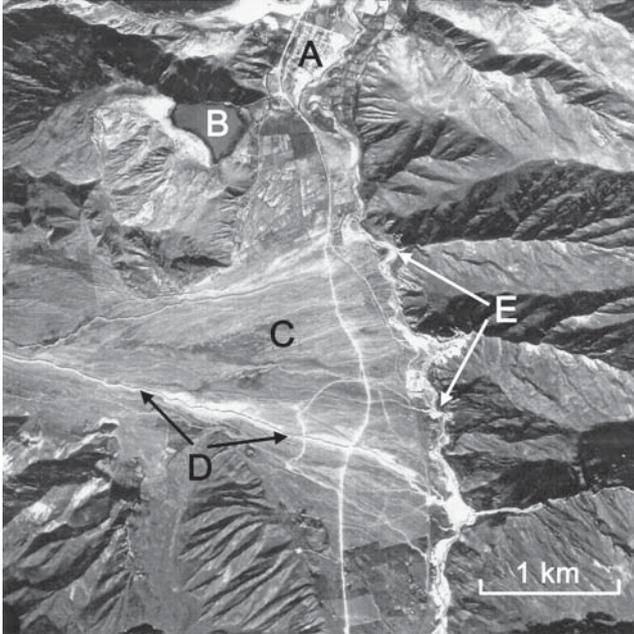


Fig. 7 - Foto aerea del grande conoide dell'Arroyo del Medio, nei pressi di Volcán. A) Volcán; B) lago di sbarramento prodotto dal cono dell'Arroyo del Medio su un affluente del Rio Grande; C) corpo principale del conoide dell'Arroyo del Medio; D) canale attivo del cono dell'Arroyo del Medio; E) alveo del Rio Grande

- Aerial photo of the large alluvial fan of Arroyo del Medio, close to Volcán. A) Volcán; B) dam lake produced by Arroyo del Medio Cone on a tributary of Rio Grande; C) main body of Arroyo del Medio Cone; D) active channel of Arroyo del Medio Cone; E) Rio Grande riverbed

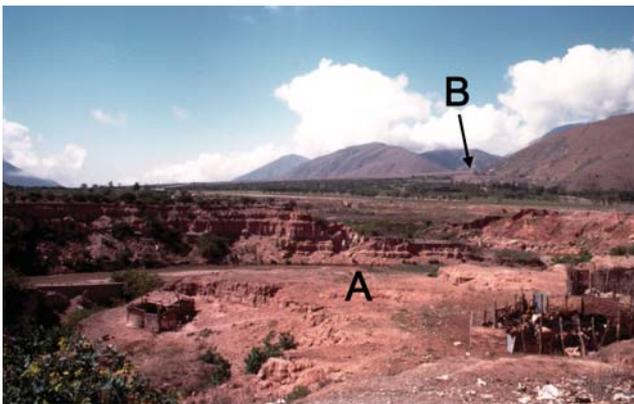


Fig. 9 - Sedimenti lacustri a monte del grande conoide dell'Arroyo del Medio che, a più riprese, anche in tempi storici, ha occluso l'alveo del Rio Grande, generando la formazione di laghi temporanei. A) sedimenti lacustri a monte dell'occlusione del Rio Grande; B) apice del cono dell'Arroyo del Medio

- Lacustrine sediments upstream the Arroyo del Medio large cone which, even in historical times, blocked the flow of Rio Grande, producing the formation of temporary lakes. A) lacustrine sediments upstream the occlusion of Rio Grande; B) apex of Arroyo del Medio Cone

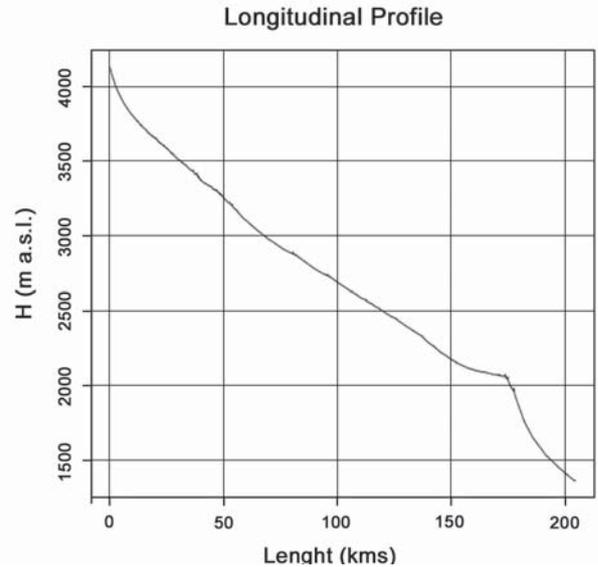


Fig. 8 - Il profilo longitudinale del Rio Grande nel tratto della Quebrada de Humahuaca, fino al Dique Los Molinos, nei pressi di San Salvador de Jujuy. L'elaborazione è basata sul DEM (Digital Elevation Model) prodotto in base ai dati SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). È evidente il livello di base locale, situato nella porzione finale del tracciato, nei pressi di Volcán, causato dagli apporti provenienti dall'Arroyo del Medio.

- Longitudinal profile of Rio Grande in the stretch of Quebrada de Humahuaca, until the Los Molinos Dam, close to San Salvador de Jujuy. The elaboration is from DEM (Digital Elevation Model) by SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) data. You can note the local base level in the final stretch of the river, produced by the large volume of material transported by Arroyo del Medio



Fig. 10 - La rottura artificiale della soglia, prodotta dai sedimenti del grande conoide dell'Arroyo del Medio nel Rio Grande, ha innescato processi di erosione regressiva nel fiume stesso che attualmente sta erodendo sia i sedimenti del conoide, sia quelli lacustri depositatisi a monte, provocando seri danni alle vie di comunicazione presenti (Ferrocarriil G.ral Belgrano)

- The artificial rupture of the threshold, produced by Arroyo del Medio large cone in the Rio Grande, is the cause of regressive erosional processes in the river which is eroding the sediments of the cone and the lacustrine ones upstream, damaging the "Ferrocarriil G.ral Belgrano"

qua. Questo ora sta incidendo i depositi di conoide e i sedimenti lacustri situati a monte, nel tentativo di eliminare il gradino nel profilo longitudinale e ristabilire la pendenza propria del suo profilo di equilibrio. Ciò comporta, come chiaramente dimostrato in Fig. 10, seri problemi alla viabilità ivi presente, in particolar modo alla ferrovia.

In altre situazioni, livelli di base locali, che hanno l'effetto di favorire processi di erosione a valle e di sedimentazione a monte, sono prodotti dalla presenza di soglie naturali, dovute all'affioramento del substrato roccioso. È questo il caso dei così detti "angostos" (lett. "strette") come quello di Yacoraita e quello del Perchel (per i riferimenti, cfr. Fig. 3).

I PROCESSI MORFOGENETICI IN ATTO

Il bacino della Quebrada de Humahuaca è interessato da intensi processi di erosione sui versanti (AGÜERO, 1986; CHAYLE & AGÜERO, 1987; BRANDÁN & VIERA, 1996; CHAYLE & OROSCO, 1996; CENCETTI *et alii*, 2001), tali da mobilitare una quantità enorme di materiale detritico che, arrivato nei fondovalle, provoca la forte aggradazione degli alvei fluviali.

Il tutto è frutto della storia geomorfologia della regione, come testimoniato anche dall'analisi ipsometrica condotta sul bacino: la curva ipsografica (Fig. 11), fortemente convessa, mostra un enorme eccesso di massa, soprattutto nella porzione mediana e bassa del bacino stesso, che deve essere eroso per raggiungere un equilibrio dal punto di vista geomorfologico.

I fattori e le condizioni che stanno alla base dei processi riscontrati possono essere ricondotti essenzialmente a:

1) fattori litologici

Sui versanti della valle del Rio Grande, nel tratto della Quebrada de Humahuaca, affiorano estese coperture detritiche di materiale sciolto, di età quaternaria. Si tratta essenzialmente di ghiaie e sabbie, imballate in una matrice limoso-argillosa, fortemente eterometriche e con clasti poco arrotondati (Fig. 12), che sono il risultato di periodi in cui le condizioni climatiche erano sicuramente più umide dell'attuale.

Si può ragionevolmente affermare che le condizioni paleoclimatiche hanno giocato un ruolo fondamentale nella morfogenesi dell'area della Quebrada. Anche se l'attività dei ghiacciai pleistocenici non ha interessato l'intera regione, evidenze di morfotipi glaciali sono ancora ben conservati alle quote più alte, sopra i 4500 m s.l.m.. Nel bacino del Rio Grande le testate di alcuni tributari mostrano circhi glaciali ormai inattivi e alcuni affluenti defluiscono inizialmente attraverso brevi valli glaciali che incidono materiali schiettamente morenici, tuttora addossati ai versanti. C'è motivo di credere, pertanto, che durante le fasi glaciali che sicuramente interessarono il bacino della Quebrada alle quote più elevate (CLAPPERTON, 1991), i processi di disgregazione fisica (principalmente il crioclastismo) siano avvenuti con un'intensità sicuramente maggiore di quanto possa accadere attualmente (CHAYLE *et alii*, 1990; CHAYLE & WAYNE, 1995; AHUMADA, 2002). Si produssero così ingenti quantità di materiale detritico che fu - ed è tuttora - mobilitato da processi di ruscella-

nomena by the river. This is now cutting through the fan deposits and lacustrine sediments found upstream, in the attempt to eliminate the step in the longitudinal profile and to reestablish the proper slope of its profile of equilibrium. As is clearly shown in Fig. 10, this causes serious problems to the roads in the area, especially the railroad.

In other situations, local base levels that have the effect of favoring erosion processes downstream and sedimentation upstream are produced by the presence of natural knickpoints, due to the outcropping of the bedrock. This is the case of the "angostos" (literally "ravines"), such as that of Yacoraita and that of Perchel (for references, cf. Fig. 3).

MORPHOGENETIC PROCESSES IN PROGRESS

The Quebrada de Humahuaca basin is affected by intense erosion processes on the slopes (AGÜERO, 1986; CHAYLE & AGÜERO, 1987; BRANDÁN & VIERA, 1996; CHAYLE & OROSCO, 1996; CENCETTI *et alii*, 2001), which mobilize an enormous quantity of detritus. Once this material arrives at the bottom of the valley, it causes substantial aggradation of the river channels.

This is all the fruit of the region's geomorphological history, as shown also by the hypsometric analysis (hypsographic curve) done on the basin (Fig. 11): strongly convex, this shows an enormous excess of mass, especially in the middle and lower portions of the basin, which must be eroded to reach an equilibrium from a geomorphological perspective.

The factors and conditions underlying the processes seen can be traced to:

1) lithological factors

On the slopes of the Rio Grande valley, in the Quebrada de Humahuaca section, broad expanses of loose detrital material outcrop. This material is from the Quaternary and is essentially gravels and sands, packed in a silty-argillaceous matrix, very heterometric and with jagged clasts (Fig. 12), which are the result of periods in which climatic conditions were surely wetter than they are at present.

It can be reasonably stated that the paleoclimatic conditions played a fundamental role in the morphogenesis of the Quebrada area. Although the Pleistocene glaciers did not cover the entire region, evidence of glacial morphotypes are still well preserved at higher altitudes, especially above 4500 m. The heads of some tributaries in the Rio Grande basin show glacial cirques that are now inactive, and some tributaries flow initially through brief glacial valleys that cut through purely morainic materials, still lying against the slopes. Thus there is reason to believe that during the glacial periods that undoubtedly involved the Quebrada basin at the higher altitudes (CLAPPERTON, 1991), the physical disintegration processes (mainly cryoclastism) took place with an intensity surely greater than what might happen today (CHAYLE *et alii*, 1990; CHAYLE & WAYNE, 1995; AHUMADA, 2002). Thus immense quantities of detritus were produced that were - and still are - mobilized by rill and gully erosion and by

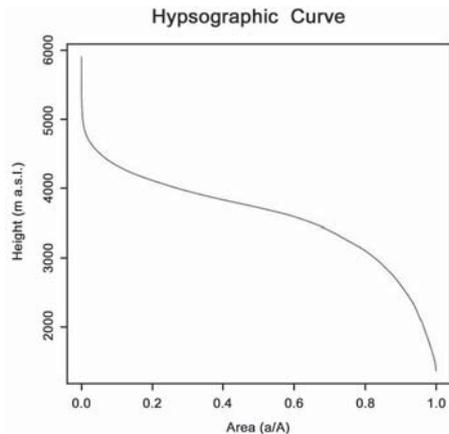


Fig. 11 - Curva ipsografica del bacino della Quebrada de Humahuaca, dal DEM basato su dati SRTM. Dopo il tratto concavo (corrispondente ai settori situati a quota più elevata del bacino, quasi esclusivamente nell'altopiano della Puna), il tratto marcatamente convesso indica un eccesso di massa, che spiega i processi di erosione riscontrati nel bacino

- *Hypsographic curve of Quebrada de Humahuaca watershed (from DEM by SRTM data). After the concave stretch (corresponding to the sectors located at higher altitudes, on the Puna Upland), the stretch strongly convex is pointing a mass surplus which explains the erosional processes observed in the basin*

mento (rill e gully erosion) e dall'innesco di colate detritiche.

La messa in posto di tali materiali sciolti è avvenuta in forma di ampi apparati conoidali, oggi sospesi sul thalweg attuale e terrazzati (cono-terrazas - Fig. 13); essi costituiscono la fonte di materiale più cospicua che alimenta le colate detritiche attuali. I debris flows incidono i conoidi suddetti e si depositano sui fondovalle oggi presenti, costruendo a loro volta altri conoidi che invadono gli alvei fluviali dei collettori principali. Il risultato è la presenza di conoidi "telescopici", di dimensioni generalmente minori muovendosi da quelli più antichi, e più alti, fino agli attuali, di ultima generazione (Fig. 14). Questi si ritrovano non solo lungo la Quebrada de Humahuaca, ma anche lungo le valli dei bacini adiacenti (vedi anche punto successivo) e costituiscono la prova più evidente di eventi climatici e tettonici che hanno interessato un'ampia area della Cordillera Oriental nel settore argentino.

2) fattori tettonici

L'intera area della Quebrada e le zone limitrofe sono state sottoposte, a più riprese, a fenomeni di sollevamento collegati alle varie fasi tettoniche compressive succedutesi dall'Eocene medio fino ad oggi. L'ultima, in ordine cronologico, è la Fase Diaguaita (YRIGOYEN, 1979), datata al passaggio tra Pliocene e Pleistocene, ma anche la neotettonica mostra inequivocabilmente il perdurare di un campo di stress di tipo compressivo (SALFITY *et alii*, 1984a; CORTÉS *et alii*, 1987; CHAYLE & CHALABE, 1990; SOLIS, 1993 - Fig. 15).

Del resto, i morfotipi presenti e appena descritti (cono-terrazas e conoidi telescopici) altro non sono che l'effetto combinato dell'alternanza di processi di erosione e sedimentazione collegati ad



Fig. 12 - Estese coperture detritiche affiorano lungo i versanti della Quebrada de Humahuaca. Il materiale viene mobilizzato dalle acque di ruscellamento, in occasione di eventi meteorici estremi, tramite processi di erosione a rivoli e a solchi e l'innesco di colate detritiche

- *Large volumes of detritic sediments outcrop on the slopes of Quebrada de Humahuaca. They are elaborated, at present, by means of rill and gully erosional processes and debris flows*

the triggering of debris flows.

The sedimentation of these loose materials occurred in the form of broad fans, today suspended over the present-day thalweg and terraced (cono-terrazas - Fig. 13); they constitute the most abundant source of material that feeds the present-day debris flows. The debris flows cut into the aforesaid fans and are deposited at the valley bottoms there today, in turn forming other fans that fill the river channels of the main collectors. The result is the presence of "telescopic" fans, generally of smaller size starting from the older ones, and higher, up to the present-day, latest generation ones (Fig. 14). These are found not only along the Quebrada de Humahuaca, but also along the valleys of the adjacent basins (see also the following point) and they constitute the clearest evidence of climatic and tectonic events that took place in a wide area of the Cordillera Oriental in Argentina.

2) tectonic factors

The entire area of the Quebrada and the surrounding areas were subject several times to rising connected with the various compressive tectonic stages that occurring from the Middle Eocene up to today. The most recent, in chronological order, is the Diaguaita Stage (YRIGOYEN, 1979), dated at the transition between the Pliocene and Pleistocene, but the neotectonics also unquestionably show the continuing of a compressive-type stress field (SALFITY *et alii*, 1984a; CORTÉS *et alii*, 1987; CHAYLE & CHALABE, 1990; SOLIS, 1993 - Fig. 15).

The morphotypes present and just described (cono-terrazas and telescopic fans) are none other than the combined effect of the alternating of erosion and sedimentation processes connected with a generalized rising, which took place several times also during the



Fig. 13 - I cono-terrazas sono ampi apparati conoidali, messi in posto nel Pleistocene, sollevati e oggi reinciati dal reticolo idrografico attuale. L'esempio raffigurato nella foto è situato nella Quebrada de Purmamarca, un tributario di destra del Rio Grande. Tali forme sono correlate a livelli di base situati a quota maggiore rispetto al thalweg attuale e dimostrano l'importanza del ruolo della tettonica recente nella morfogenesi del rilievo

- *The "cono-terrazas" are large alluvial fans, of Pleistocene age, risen and at present downcutted by the hydrographic net. The picture represents an example in the Quebrada de Purmamarca, a tributary in the right of Rio Grande. They are related to base levels located at heights more elevated than the present ones and show the importance of the role of neotectonics in the morphogenesis*

un sollevamento generalizzato, avvenuto a più riprese anche durante il Pleistocene e l'Olocene. Da qui la presenza di varie generazioni di conoidi, che si formano ognuno a spese del più antico, seguendo l'abbassamento del livello di base (rappresentato dalla quota del collettore principale). Tutto ciò comporta, a sua volta, l'approfondimento della rete idrografica. È difficile datare con precisione tali scatti di sollevamento, anche perché essi sono avvenuti in maniera differenziata all'interno della regione, sia come entità del sollevamento stesso, variabile da luogo a luogo, sia perché hanno prodotto, localmente, diverse generazioni di conoidi (se ne riconoscono fino a sei in qualche luogo - SEGEMAR, 1998). Al proposito, molto interessante è l'area del Departamento de Iruya, appena a Nord della Quebrada de Humahuaca, lungo il Rio Coranzuli (Figg. 16-20), dove si è verificato un forte approfondimento della rete idrografica, a dimostrazione che tali processi di erosione rappresentano un motivo comune nell'Argentina nord-occidentale (MÉNDEZ *et alii*, 1979; RAFAELLI *et alii*, 1999; REYNOLDS *et alii*, 1996; VIERA & BRANDÁN, 1997).

Il risultato del sollevamento generalizzato dell'area della Quebrada e dei bacini limitrofi è, in ogni caso, l'aumento di pendenza che si realizza lungo i corsi d'acqua e i fossi di ruscellamento concentrato che provengono dai versanti e, pertanto, un



Fig. 14 - I conoidi telescopici sono morfotipi frequenti presenti non solo lungo la Quebrada de Humahuaca, ma anche lungo le valli dei bacini adiacenti. Ciò, a testimonianza di eventi climatici e tettonici di importanza regionale che hanno interessato l'intera regione della Cordillera Oriental nel settore argentino nord-occidentale

- *The "telescopic fans" are frequent morphotypes both along the Quebrada de Humahuaca, and along the valleys of neighbouring watersheds. This is a proof of climatic and tectonic events affecting a wide area of Cordillera Oriental in northwestern Argentina*

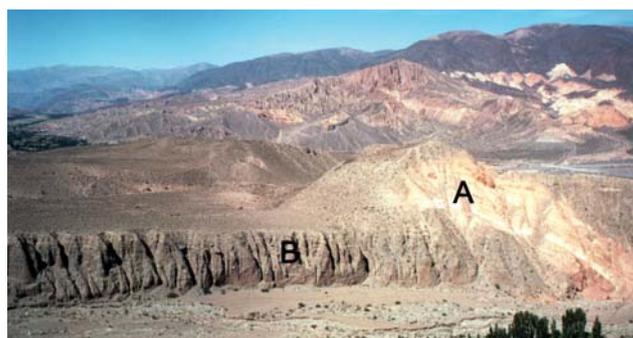


Fig. 15 - Faglia inversa presso Tilcara, che mostra sedimenti del Terziario (A) sovrascorsi sui sedimenti antichi di conoide (B, Pleistocene)

- *Reverse fault close to Tilcara, showing Tertiary sediments (A) overthrusting ancient alluvial fans sediments (B, Pleistocene)*

Pleistocene and Holocene. Thus there are various generations of fans, each of which is formed at the expense of the older fan, following the lowering of the base level (represented by the elevation of the main collector). All of this brings about, in turn, the deepening of the channel net. It is difficult to give a precise date to these rising periods, also because they occurred in a differentiated manner within the region, both as regards the extent of the rising itself, which varies from place to place, and because locally they produced various generations of fans (up to six can be recognized in some places - SEGEMAR, 1998). In this regard, of considerable interest is the area of the Departamento de Iruya, just north of the Quebrada de Humahuaca, along the Rio Coranzuli (Fig. 16-20), where the channel net deepened substantially, demonstrating that these erosion processes are a common occurrence in northwestern Argentina (MÉNDEZ *et alii*, 1979; RAFAELLI *et alii*, 1999; REYNOLDS *et alii*, 1996; VIERA & BRANDÁN, 1997).

The result of the generalized rising of the Quebrada area and of the surrounding basins is, in any case, the increase in the grade that is created along the streams coming from the slopes and, therefore,

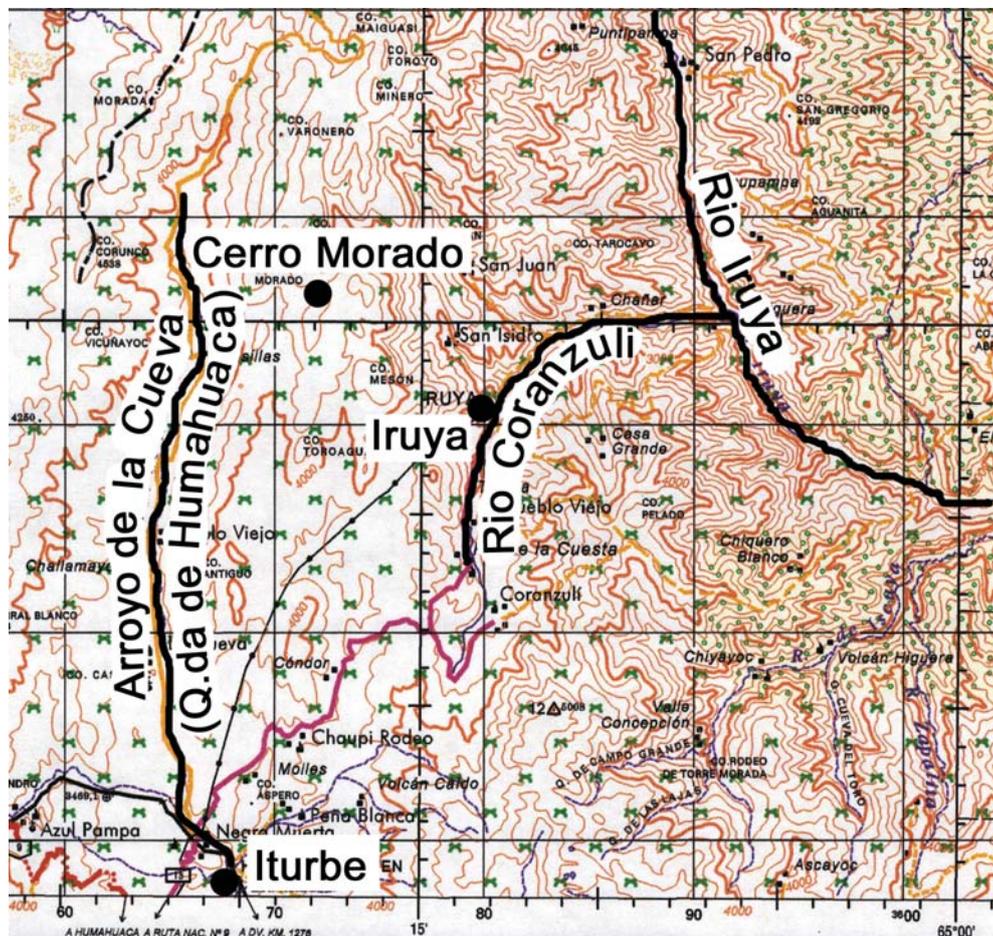


Fig. 16 - Il bacino del Rio Coranzuli - Rio Iruya è situato al confine tra la provincial di Salta e quella di Jujuy, appena a Nord della Quebrada de Humahuaca
 - The hydrographic basin of Rio Coranzuli - Rio Iruya is located at the boundary between the Provinces of Salta and Jujuy, at North of the Quebrada de Humahuaca

aumento della stream power e del loro potere erosivo; i sedimenti sciolti o poco consolidati, descritti nel punto precedente, sono presi facilmente in carico e trasportati verso i fondovalle, determinando un surplus di trasporto solido nei collettori principali.

3) condizioni climatiche attuali

Le caratteristiche climatiche, di tipo subarido, non permettono lo sviluppo vegetazionale, tanto da rendere ancora più vulnerabili all'erosione i versanti vallivi. D'altra parte, il deficit idrico non permette il raggiungimento di portate liquide nei corsi d'acqua sufficienti a smaltire l'eccesso di trasporto solido proveniente dai versanti e dai tributari sotto forma di ruscellamento concentrato e debris flows (coladas de barro), durante i pochi ma intensi eventi meteorici.

Il risultato di tutto ciò è la tendenza all'aggradazione degli alvei nei fondovalle.

In pratica, si può affermare che la tendenza generalizzata è al sollevamento ed all'approfondimento della rete idrografica, che avviene in tempi geologici a causa del perdurare della tettonica di tipo compressivo che interessa tutta l'area della Cordillera.

an increase in stream power and in their erosive power; the streams, flowing over sediments that are loose or not very consolidated such as those described in the preceding point, easily pick them, transporting them toward the valley bottoms and bringing about a surplus of solid transport in the main collectors.

3) present climatic conditions

The subarid climatic characteristics do not allow plant development, making the slopes of the valley even more vulnerable to erosion. Moreover, the water deficit does not allow the rivers to arrive at flows sufficient for getting rid of the excess of solid transport coming from the slopes and tributaries in the form of concentrated rill and gully erosion and debris flows (coladas de barro) during the few but intense rainfalls.

The result of all this is the tendency toward the aggradation of the channels at the valley bottoms.

It can be said that the generalized tendency is toward rising and the deepening of the channel net, which occurs in geologic time due to the continuance of the compressive tectonics occurring in the entire Cordillera area.

Nevertheless, the resulting erosion-sedimentation processes are



Fig. 17 - Il Rio Coranzuli (B) e, nello sfondo, il Cerro Morado (A). È evidente il netto approfondimento subito dal corso d'acqua, che ha lasciato a quota più elevata gli antichi depositi di conoidi coalescenti, frutto di una fase deposizionale antecedente al sollevamento
 - Rio Coranzuli (B) and, on the background, the Cerro Morado (A). You can note the deepening of the stream, which abandoned at higher elevation the ancient sediments of coalescent alluvial fans, produced by a sedimentary stage precedent to the rising



Fig. 18 - Rio Coranzuli. Si nota il piedmont "appeso" a quota più elevata (A), a dimostrazione della rapidità del sollevamento. Nonostante non si abbiano dati sull'età dei sedimenti, la freschezza dei morfotipi non lascia dubbi sull'età molto recente dell'approfondimento
 - Rio Coranzuli. You can note the hanging piedmont (A): it shows that the uplift was very fast. We don't have data about the age of the sediments, but the "freshness" of such the morphotypes is evident

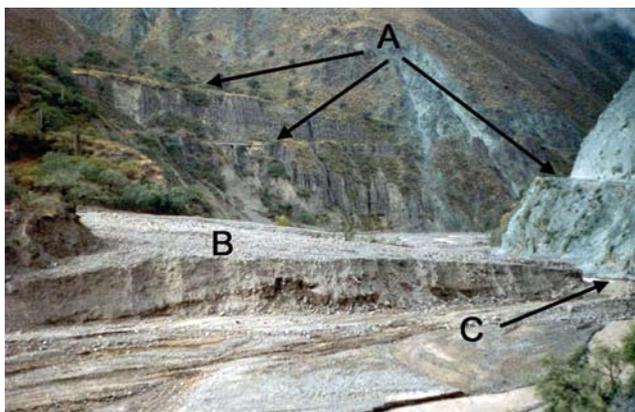


Fig. 19 - Un classico esempio di conoidi telescopici e di cono-terrazza lungo il Rio Iruya. A) superfici relitte di antichi conoidi alluvionali; B) conoide alluvionale recente; C) conoide alluvionale attuale
 - A classic example of telescopic fans and "cono-terrazza" along Rio Iruya. A) relicts surfaces of ancient alluvial fans; B) recent alluvial fan; C) present alluvial fan

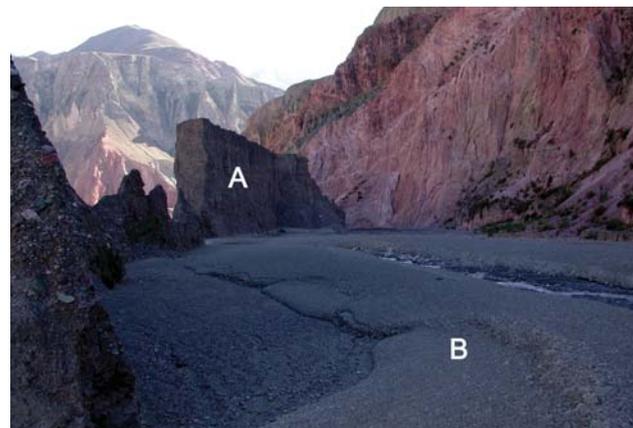


Fig. 20 - Sedimenti attuali dovuti a processi di debris flow lungo il Rio Iruya (B). Sono evidenti anche i sedimenti di conoide più antichi, ormai abbandonati a quota più elevata (A)
 - Sediments due to debris flow processes along Rio Iruya (B). You can note also the ancient alluvial fan sediments abandoned at higher elevation (A)

Tuttavia, i processi di erosione-sedimentazione che ne derivano sono il frutto del delicato equilibrio esistente tra i seguenti elementi:

- 1) entità del sollevamento;
- 2) processi di erosione sui versanti;
- 3) trasporto solido;
- 4) capacità di smaltimento dei depositi da parte dei collettori principali.

Il primo elemento è controllato dalla tettonica in atto.

Il secondo elemento è controllato in parte dalla tettonica (vedi approfondimento del reticolo idrografico), dalle condizioni climatiche (presenza/assenza di vegetazione e presenza/assenza di eventi meteorici capaci di mobilizzare per ruscellamento e debris flows il materiale detritico) e, per l'appunto, dalle caratteristiche geotecniche del materiale che può essere mobilizzato (più facilmente o più difficilmente erodibile).

Il terzo elemento è controllato sia dalle caratteristiche granulometriche del materiale che arriva in alveo, sia dalle condizioni cli-

the fruit of the delicate equilibrium existing between the following elements:

- 1) extent of the rising;
- 2) erosion processes on the slopes;
- 3) solid transport;
- 4) the main collectors' ability to carry off the sediments.

The first element is controlled by the tectonics taking place.

The second element is controlled partly by the tectonics (see deepening of the channel net), by climatic conditions (presence/absence of vegetation and presence/absence of meteorological events capable of mobilizing the detrital material by rill and stream erosion and debris flows) and, naturally, by the geotechnical characteristics of the material that can be mobilized (is eroded more easily or with more difficulty).

The third element is controlled by both the granulometric characteristics of the material that arrives in the channel, and by the cli-

matiche, in grado di controllare l'entità del deflusso e la capacità da parte dei collettori di raggiungere portate tali da smaltire l'eventuale eccesso di materiale solido proveniente dai versanti.

Il quarto elemento è controllato esclusivamente dalle condizioni climatiche, dato che dipende solo dall'entità delle portate liquide.

Sulla base di quanto esposto, l'evoluzione geologico-geomorfologica recente del Nord-Ovest argentino nell'area della Cordillera può essere così sintetizzata:

- Sicuramente c'è stato un periodo (Pleistocene s.l. - CHAYLE & WAYNE, 1995), più umido dell'attuale, in condizioni periglaciali, caratterizzato da maggiori precipitazioni e da intensi processi di disgregazione fisica (crioclastismo). È così che probabilmente si produsse l'enorme quantità di materiale detritico sciolto che oggi si trova sui versanti e che riempì le Quebradas più importanti (es. Formación. Purmamarca). In un lavoro pubblicato dal Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR, 1998), gli autori tendono a minimizzare l'effetto che avrebbero avuto le condizioni climatiche periglaciali nella produzione detritica, evidenziando piuttosto l'origine schiettamente alluvionale dei depositi. Tali autori prestano grande importanza al ruolo che avrebbe avuto il grande conoide alluvionale presente appena a Sud di Tumbaya, rappresentato nello schema geologico di Fig. 4 come appartenente alla Formación Purmamarca e situato in corrispondenza dell'area compresa tra Volcán e Tumbaya. Oggi tale conoide risulta sospeso sul thalweg attuale, perché reinciso dai processi di approfondimento del Rio Grande. Questo avrebbe funzionato proprio allo stesso modo dell'attuale cono dell'Arroyo del Medio, situato appena più a Sud e tuttora attivo. In pratica il conoide, costituendo un livello di base locale, avrebbe inibito l'approfondimento del Rio Grande in questo tratto e quindi favorito la sedimentazione in alveo in tutta l'area a monte, determinando la messa in posto della Formación Purmamarca.

È opinione dello scrivente che, senza dubbio, i conoidi descritti hanno avuto un'importanza locale (il cono dell'Arroyo la ha ancora) nel favorire i processi di sedimentazione suddetti; è altrettanto vero, tuttavia, che la presenza del materiale detritico quaternario è un fenomeno senza dubbio più esteso regionalmente, che va anche oltre i confini del bacino della Quebrada (vedi l'area di Iruya prima menzionata), facendo pensare, pertanto, ad un fenomeno generalizzato, quale può essere quello di tipo climatico. In ogni caso, al di là dell'interpretazione sulle cause di innesco dei processi di sedimentazione anzi detti, ciò che più interessa in questa sede è la presenza in sé del materiale detritico, per le conseguenze che tale elemento ha prodotto nel favorire i processi di erosione oggi riscontrati, che tendono a mobilitarlo nuovamente.

- Si può ragionevolmente assumere, per quanto appena detto, che la messa in posto del materiale detritico sia avvenuta in una situazione di relativa stasi tettonica. Questa ha permesso il mantenimento, per un periodo di durata ignota (a causa della scarsità degli elementi a disposizione), di un livello di base stabile dell'erosione ed ha provocato la conseguente formazione degli estesi conoidi coalescenti che oggi troviamo a quota più elevata rispetto al thalweg attuale. Essi for-

matic conditions, which can control the extent of the flows and the collectors' ability to arrive at flows that can carry away the excess solid material coming from the slopes.

The fourth element is controlled exclusively by climatic conditions, a fact that depends solely on the extent of the water discharge.

The recent geologic-geomorphological evolution in north-western Argentina in the Cordillera area can be summarized as follows:

- There was surely a period (Pleistocene s.l. - CHAYLE & WAYNE, 1995) wetter than at present, in periglacial conditions, characterized by greater precipitation and by intense physical disintegration processes (cryoclastism). This is probably what produced the enormous quantity of loose detritus found today on the slopes and that fills the most important Quebradas (e.g. Formación. Purmamarca). In a work published by the Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR, 1998), the authors tend to minimize the effect that periglacial climatic conditions would have had in the production of detritus, indicating rather the purely alluvial origin of the deposits. These authors give great importance to the role that would have been played by the large alluvial fan that is just south of Tumbaya, represented in the geologic sketch in Fig. 4 as belonging to the Formación Purmamarca and located in the area between Volcán and Tumbaya. Today this fan is suspended over the present-day thalweg, as it is cut through again by the deepening processes of the Rio Grande. This would have functioned in the same way as the present-day Arroyo del Medio cone located just a bit farther south and still active. Being the local base level, the fan would have inhibited the deepening of the Rio Grande in this stretch and thus it would have favored sedimentation in the channel in the entire area upstream, causing the sedimentation of the Formación Purmamarca.

It is this author's opinion that the fans described were undoubtedly important locally (the Arroyo cone still is) in favoring the aforesaid sedimentation processes; it is also true, however, that the presence of Quaternary detritus is undoubtedly a phenomenon that is more extensive regionally, that also goes beyond the confines of the Quebrada basin (see the Iruya area mentioned previously), thus suggesting a generalized phenomenon, such as may be a climate-related phenomenon. In any event, apart from the interpretation of the causes triggering the aforesaid sedimentation processes, what is more interesting here is the presence itself of the detritus, for the consequences brought on by this element in favoring the erosion processes seen today, which tend to mobilize it once again.

- It can reasonably be assumed, from what has just been said, that the sedimentation of the detritus took place in a situation of relative tectonic stasis. This has made it possible to maintain, for a period of unknown duration (due to the scarcity of elements available), a stable erosion base level, and this brought about the consequent formation of the large coalescent fans that we find today at a higher elevation than the current thalweg. They form a vast piedmont today rec-

mano un vasto piedmont, oggi riconoscibile sia all'interno della Quebrada de Humahuaca (Purmamarca, Tilcara, Humahuaca etc. - SEGEMAR, 1998), sia nelle aree limitrofe (es. Iruya).

- La ripresa del sollevamento deve essere avvenuta tramite fasi successive, che hanno prodotto la presenza dei morfotipi oggi presenti (cono-terrazas e conoidi telescopici). Questi, tuttavia, sono il frutto del delicato equilibrio esistente tra l'entità del sollevamento, variabile sia in senso spaziale che temporale, la produzione detritica dai versanti e la capacità di smaltimento del trasporto solido da parte dei corsi d'acqua recipienti. Quando le condizioni climatiche permettono il raggiungimento di portate liquide adeguate, il materiale viene trasportato via, verso valle e, se è disponibile stream power in eccesso, stante il perdurare del sollevamento, possono avvenire anche fenomeni di erosione e di approfondimento degli alvei principali. Se, invece, come succede nella condizione attuale, le portate liquide sono ridotte al minimo a causa dell'aridità del clima, gli alvei principali vengono sovralluvionati. Non viene permessa, infatti, l'evacuazione di tutto il materiale che proviene comunque dai versanti, in occasione dei pochi, ma intensi eventi meteorici estivi che alimentano i conoidi presenti alla confluenza tra i tributari ed il collettore principale. In pratica, il tasso di sedimentazione in alveo è tale da compensare la velocità di sollevamento e l'approfondimento dell'alveo stesso.

Probabilmente, la situazione attuale è anche caratterizzata da una minore velocità di sollevamento rispetto alle fasi tettoniche precedenti. Prova ne sia il fatto che, dove le precipitazioni sono più intense ed il clima è meno severo (come nella porzione meridionale della Quebrada de Humahuaca, a Sud di Volcán), la tendenza è quella di riformare grandi apparati conoidali, come quello dell'Arroyo del Medio, situato al limite della soglia climatica già descritta, che tanto assomiglia a quello, oggi sospeso sul thalweg attuale, di Tumbaya.

In conclusione, sulla base dei dati a disposizione e delle osservazioni effettuate, si può affermare che, nella situazione attuale, si ha la presenza contemporanea di due processi solo apparentemente contrastanti: da una parte si osserva la tendenza all'approfondimento della rete idrografica ad una scala temporale geologica, a causa del protrarsi del sollevamento, anche se questo avviene in maniera variabile, sia in senso temporale, sia in senso spaziale; dall'altra, a breve termine, cioè ad una scala temporale storica, si osserva la tendenza all'aggradazione degli alvei (con tutti i rischi che questo comporta), a causa delle condizioni climatiche attuali, non certamente favorevoli allo smaltimento di tutto il carico solido che arriva ai corsi d'acqua.

La fig. 21 supporta con efficacia l'interpretazione sopra descritta.

LE CONDIZIONI DI RISCHIO

I processi morfogenetici in atto nella Quebrada de Humahuaca e, in generale, in gran parte del Nord-Ovest argentino, si esplicano tramite una serie di fenomeni, legati alla dinamica dei versanti ed alla dinamica d'alveo, che comportano evidenti condizioni di rischio geologico.

Quello dovuto ai debris flows, che si verificano in concomitan-

ognizabile both in the Quebrada de Humahuaca (Purmamarca, Tilcara, Humahuaca, etc. - SEGEMAR, 1998) and in the neighboring areas (e.g. Iruya).

- The resumption of the rising must have taken place by means of successive stages, which produced the morphotypes found today (cono-terrazas and telescopic fans). These are the fruit, however, of the delicate equilibrium existing between the extent of the rising, variable both spacewise and timewise, the producing of detritus from the slopes, and the capacity of the receiving rivers to carry away the solid transport. When climatic conditions allow the reaching of adequate water discharge, the material is carried away downstream, and if stream power in excess is available, with the continuance of the rising, there can also be erosion and the deepening of the main channels. If instead, as is happening in current conditions, the flows are reduced to a minimum due to the aridity of the climate, there is aggradation in the main channels. The rivers are not able to evacuate of all of the material coming from the slopes during the few, but intense, summer rains that feed the fans found at the confluence between the tributaries and the main collector. In practice, the rate of sedimentation in the channel is such as to compensate the rate of rising and the deepening of the channel.

The current situation is probably also characterized by a slower rising rate compared to the preceding tectonic stages. This is proved by the fact that where precipitation is more intense and the climate is less harsh (as in the southern portion of the Quebrada de Humahuaca, south of Volcán), the tendency is to reform the large fans, such as the Arroyo del Medio cone, located at the limits of the climatic threshold described earlier, which is very similar to that of Tumbaya, today suspended over the present-day thalweg.

In conclusion, on the basis of on the data available and the observations made, it can be stated that in the current situation there are two processes taking place at the same time that are only apparently contrasting: on the one hand one observes the tendency toward the deepening of the channel net on a geologic time scale, due to the continuation of the rising, even though this takes place in a variable manner, both timewise and spacewise; on the other hand, in the short term, i.e. on a historic time scale, one observes the tendency toward the aggradation of the channels (with all the risks this implies), due to the present climatic conditions, which are certainly not favorable for carrying away all the solid load that arrives at the rivers.

Figure 21 effectively supports the interpretation described above.

RISK CONDITIONS

The morphogenetic processes now happening in the Quebrada de Humahuaca and, in general, in most of northwestern Argentina, take place through a series of phenomena connected with the slope dynamics and the river dynamics, which bring about evident conditions of geologic risk.

The risk due to debris flows, which occur together with summer rainfalls, is without a doubt the most important (HARRINGTON,



Fig. 21 - La foto, scattata lungo il Rio Iruya, dimostra la coesistenza di morfotipi che indicano, da un lato, il processo dominante a scala di tempo geologico, cioè l'erosione e l'approfondimento della rete idrografica, che avviene tramite l'incisione dei sedimenti antichi di conoide (a sinistra); dall'altro lato, è chiara la tendenza al sovralluvionamento ed all'aggradazione degli alvei, processo dominante a breve termine, come dimostrato dai sedimenti da colata detritica che invadono l'alveo attuale

- *The picture, taken along Rio Iruya, shows the co-existence of morphotypes pointing, on the hand, the dominant process at a geological time scale, i.e. the vertical erosion and the deepening of the hydrographic net, occurring by means of downcutting of ancient alluvial fan sediments (on the left); on the other, the tendency is evident to overflowing and to the aggradation of the riverbeds, that is the dominant process at a short-time scale, as the sediments of debris flow process invading the whole riverbed show*

za con gli eventi pluviometrici estivi, è senza dubbio il rischio più importante (HARRINGTON, 1943; CHAYLE & AGÜERO 1987; CHAYLE & WAYNE, 1995; CHAYLE & OROSCO, 1996; CENCETTI *et alii*, 2001; 2004; 2006). È, soprattutto, il continuo fenomeno di innalzamento del thalweg dei corsi d'acqua, dovuto ai già descritti fenomeni di aggradazione degli alvei fluviali, a provocare fattori di rischio per i villaggi disseminati lungo la Quebrada de Humahuaca e le Quebradas laterali. In figg 22-23 sono rappresentate le condizioni in cui versano i centri abitati di Purmamarca e di Humahuaca, sulle sponde delle omonime Quebradas.

In alcuni casi i villaggi ed anche i centri abitati maggiori, spesso mete di flussi turistici tutt'altro che trascurabili, sono stati edificati in situazioni già di per sé soggette a forte rischio da alluvionamento: la stessa Tilcara, uno dei più importanti villaggi della Quebrada, è interamente costruita sul conoide attivo del Rio Huasamayo che presenta il suo alveo pensile (al pari degli esempi già visti) rispetto all'area dove sorge l'abitato (Fig. 24).

Emblematico è anche il caso di Iruya, il cui nucleo storico è costruito sugli antichi depositi di conoide (Fig. 25); l'approfondimento del Rio Coranzuli ha innescato scalzamenti al piede dei depositi quaternari che mettono in serio pericolo le abitazioni situa-

1943; CHAYLE & AGÜERO 1987; CHAYLE & WAYNE, 1995; CHAYLE & OROSCO, 1996; CENCETTI *et alii*, 2001; 2004; 2006). It is above all the continuous phenomenon of the rising of the thalweg in the rivers, due to the previously described aggradation of the river channels, that gives rise to risk factors for the villages along the Quebrada de Humahuaca and the lateral Quebradas. The conditions of the Purmamarca and Humahuaca villages (on the edges of the Quebradas of the same name) are illustrated in Figures 22 and 23.

In some cases the villages and also the larger towns, often popular tourist destinations, were built in situations already subject to considerable flooding risks: Tilcara, one of the most important villages of the Quebrada, is entirely built on the active fan of the Rio Huasamayo, the channel of which is suspended over the area where the village stands (Fig. 24).

The case of Iruya is also emblematic; its historic old town is built on top of ancient fan deposits (Fig. 25). The deepening of the Rio Coranzuli has triggered undermining at the foot of the Quaternary deposits that put the buildings standing at the edge of the terraced area in serious danger. Furthermore, the lack of space for urban expansion has also forced the people to build in equally unstable zones (Fig. 26).

The sedimentary surplus, produced by the tributaries and direct-



Fig. 22 - Il centro abitato di Purmamarca (A) è situato ai margini della Quebrada omonima (B), in evidenti condizioni di rischio da alluvionamento
 - The village of Purmamarca (A), along the homonymous "Quebrada" (B), is affected by evident flood risk



Fig. 23 - Le stesse condizioni di rischio di alluvionamento valgono per Humahuaca (A), situata lungo il Rio Grande, il cui alveo (B) è nettamente pensile al di sopra della pianura alluvionale
 - The same situation of flood risk is in the village of Humahuaca (A), along Rio Grande, whose riverbed (B) is suspended over the alluvial plain

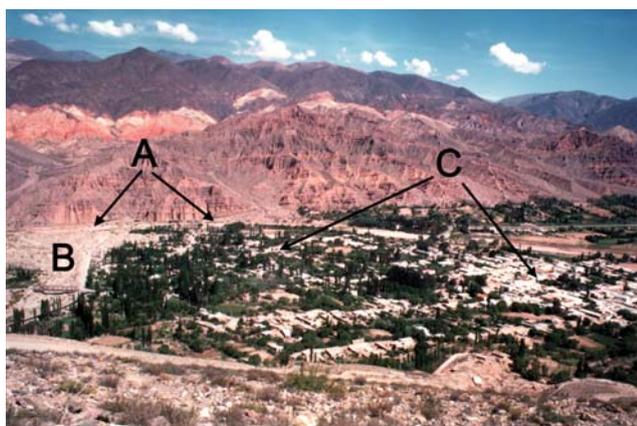


Fig. 24 - Il villaggio di Tilcara è costruito sul conoide attivo del Rio Huasamayo. A) Rio Grande; B) Rio Huasamayo; C) centro abitato di Tilcara
 - The village of Tilcara is built over the Huasamayo active alluvial fan. A) Rio Grande; B) Rio Huasamayo; C) Tilcara

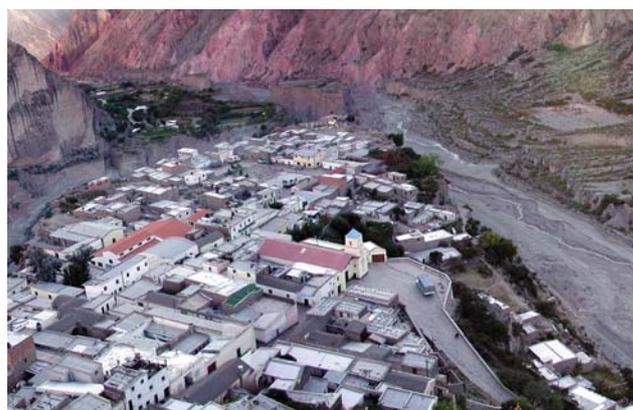


Fig. 25 - Il centro storico di Iruya è costruito su una superficie terrazzata costituita da sedimenti antichi di conoide, oggi reincisi dalla rete idrografica
 - The historical centre of Iruya is built on the terraced surface, made by ancient alluvial fan sediments, which are downcutted at present by the hydrographic net



Fig. 26 - L'area di espansione urbana di Iruya non è esente dal rischio da alluvionamento. A) conoide attivo; B) aree soggette a rischio di alluvionamento
 - *The area of urban expansion of Iruya is not free from flood risk. A) active alluvial fan; B) area affected by flood risk*

te ai margini della superficie terrazzata. D'altra parte, anche la mancanza di spazi dedicati all'espansione urbanistica ha costretto la popolazione a edificare in zone altrettanto insicure (Fig. 26).

Il surplus sedimentario, prodotto dai tributari e direttamente dai versanti, è tale da interessare spesso anche le poche aree coltivate, dove è presente una stretta pianura alluvionale, presenti lungo il Rio Grande (es. Maimará - Fig. 27), mettendo a dura prova le attività agricole che, insieme con la pastorizia, sono le uniche fonti di sostentamento delle popolazioni presenti.

Tuttavia, a risentire maggiormente della pericolosità delle colate sono le vie di comunicazione (Ruta Panamericana e Ferrocarril General Belgrano). Queste sono di importanza strategica, in quanto rappresentano le uniche vie di comunicazione terrestre tra Argentina e Bolivia e risultano continuamente interrotte a causa delle coladas de barro che si verificano nei mesi estivi (Fig. 28). La ferrovia, fin dal 1992, è stata completamente abbandonata, in quanto i costi di manutenzione sono stati considerati insostenibili (circa 1/7 dei costi di manutenzione totali di tutta la rete ferroviaria argentina).

Una situazione veramente tragica, con risvolti irreversibili dal punto di vista socio-economico e turistico. In pochi lustri, dall'epoca in cui il Ferrocarril è stato chiuso (inizio anni '90), la popolazione che abitava nei villaggi della Quebrada si è più che dimezzata.



Fig. 27 - Anche l'area di Maimará (A), sede di importante attività agricola, grazie alla presenza di una seppur stretta pianura alluvionale lungo il Rio Grande (B), è interessata dal rischio di alluvionamento
 - *Even the village of Maimará (A), where the farming activity is carried on along the narrow portions of Rio Grande (B) alluvial plain, is affected by flood risk*



Fig. 28 - Un ponte sul Ferrocarril "Gral Belgrano", completamente sepolto dalle colate detritiche ed oggi assolutamente inutilizzato
 - *A bridge of the Ferrocarril "G. ral Belgrano", completely buried by debris flows and at present absolutely useless*

ly from the slopes, is such as to involve also the few cultivated areas along the Rio Grande, where there is a narrow alluvial plain (e.g. Maimará - Fig. 27), causing great difficulties for farming which, together with animal rearing activities, are the sole source of sustenance for the people living there.

What is most subject to the danger of debris flows, however, are the roads (the Ruta Panamericana and Ferrocarril General Belgrano). These are of strategic importance, as they represent the land routes between Argentina and Bolivia and are continuously interrupted by the coladas de barro that take place in the summer (Fig. 28). The railroad has been completely abandoned since 1992, because it was decided that maintenance costs were too high (about 1/7 of the total maintenance costs for the entire Argentine railroad network).

It is a truly tragic situation, with irreversible consequences from a socioeconomic and tourism perspective. In a little more than a decade, since the Ferrocarril railroad has been shut down, the population of the villages in the Quebrada has dropped by more than one half.

CONCLUSIONI

In Fig. 29 è riportato uno schema concettuale che mette in relazione i processi morfogenetici osservati nell'area della Cordillera Oriental - settore argentino, con gli agenti, i fattori e le condizioni che stanno alla base dei processi stessi e delle situazioni di rischio riscontrate.

Nel Nord-Ovest dell'Argentina (area della Cordillera Oriental) le condizioni paleoclimatiche, più rigide ed umide di quelle attuali, sono alla base di un'intensa produzione detritica che ha portato alla messa in posto di estese coltri di sedimenti clastici. Le condizioni climatiche attuali, di tipo subarido, caratterizzate da pochi ma intensi eventi meteorici, unite al sollevamento tettonico, hanno causato sia intensi processi di erosione sui versanti, sia un approfondimento generalizzato della rete idrografica. Quest'ultimo processo agisce a scala di tempo geologica ed i suoi segni sono inequivocabilmente

CONCLUSIONS

Figure 29 gives a conceptual diagram that connects the morphogenetic processes observed in the Argentine section of the Cordillera Oriental with the agents, factors and conditions underlying these processes and the risk situations noticed.

In northwestern Argentina (Cordillera Oriental area) the paleoclimatic conditions - colder and wetter than the current conditions - form the basis for an intense production of detritus that led to the sedimentation of broad layers of clastic sediments. The present-day subarid climatic conditions, which are characterized by infrequent but intense rainfalls, together with tectonic rising, have caused intense erosion processes on the slopes as well as a general deepening of the channel net. The latter process acts in a geologic time scale, and its signs are unmistakably represented by the

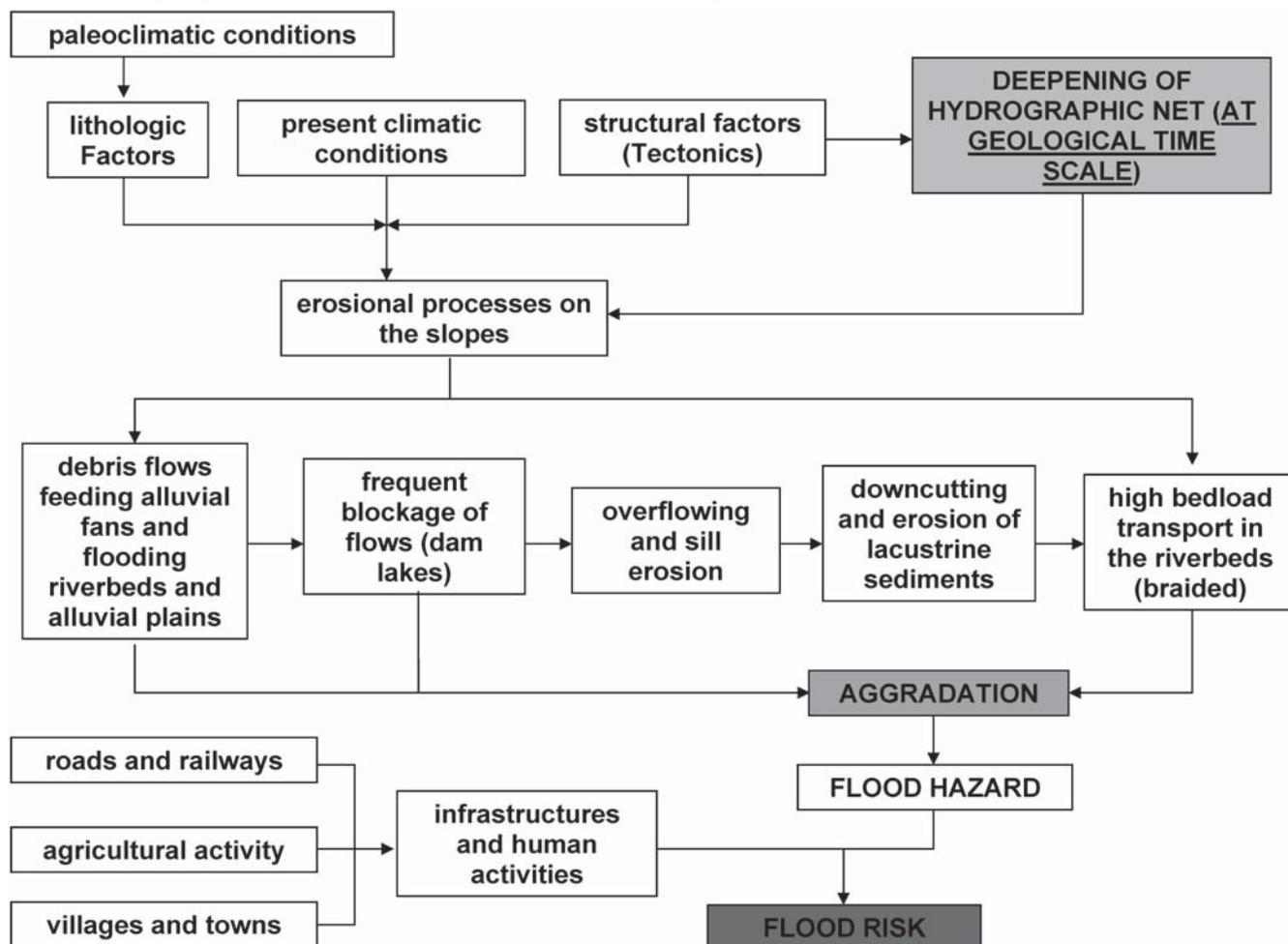


Fig. 29 - Schema concettuale che illustra le relazioni tra processi morfogenetici osservati e loro cause, in termini di agenti, fattori e condizioni, nel Nord-Ovest argentino
 Conceptual scheme illustrating the relationships between observed processes and its causes, in terms of agents, factors and conditions in the NW Argentina

rappresentati dai morfotipi che caratterizzano il rilievo attuale.

I processi erosivi sui versanti si manifestano, invece, sia come produzione detritica dovuta a fenomeni di *rill* e *gully erosion*, sia tramite l'innescio di colate detritiche che alimentano i conoidi presenti nei fondovalle, allo sbocco dei tributari nei collettori principali, e alluvionano gli alvei e la pianura fluviale circostante.

Le colate, spesso, sono tali da provocare il restringimento degli alvei fluviali o anche vere e proprie occlusioni d'alveo, favorendo la formazione di laghi di sbarramento. Quando le acque tracimano dal corpo occludente, velocemente erodono la soglia venutasi a formare ed iniziano processi di erosione regressiva che smantellano lo sbarramento ed erodono gli eventuali sedimenti lacustri depositatisi a monte dell'occlusione.

Tutto ciò contribuisce, in maniera sinergica, alla produzione detritica ed all'aumento del trasporto solido (specie di quello di fondo) riscontrato negli alvei fluviali, tutti di tipo braided.

Sia le colate detritiche, sia l'enorme trasporto solido nei corsi d'acqua sono i diretti responsabili dei fenomeni di aggradazione degli alvei riscontrati. È questo, oggi, il processo dominante, che agisce a breve termine (scala temporale storica).

Infatti, l'alternanza dei processi di erosione e di sedimentazione è frutto del delicato equilibrio esistente tra la velocità con cui si manifesta il sollevamento tettonico e la velocità di sedimentazione, controllata soprattutto dalle condizioni climatiche e dalle caratteristiche di erodibilità del substrato. Se, come avviene attualmente, le condizioni di tipo subarido non garantiscono, nei corsi d'acqua, il raggiungimento di portate adeguate a smaltire l'eccesso di materiale solido proveniente dai versanti, l'aggradazione diventa il processo dominante.

L'aggradazione degli alvei fluviali comporta la presenza di letti pensili sulle loro pianure alluvionali e quindi, di per sé, pericolosità di alluvionamento nelle aree circostanti; pericolosità, che diventa vero e proprio rischio quando i fenomeni di inondazione interessano, come spesso succede, centri abitati, vie di comunicazione e, in generale, infrastrutture ed attività socio-economiche (compresa l'attività agricola, l'unica da cui traggono serio sostentamento gli abitanti di quest'area, tra le più degradate dell'Argentina dal punto di vista economico).

Il problema è complesso e di non facile soluzione, considerata soprattutto l'intensità dei fenomeni riscontrati e descritti, che non sono affrontabili tramite i normali interventi di mitigazione del rischio geologico-idraulico (riforestazione, costruzione di opere strutturali quali briglie di trattenuta, piazze di deposito, strutture di intercettazione o di diversione delle colate, etc.) che pure conservano la loro validità in altre condizioni climatiche e geologiche, ma che qui si dimostrano o impossibili da realizzare o assolutamente inefficaci e insufficienti a controllare l'intensità dei fenomeni.

Occorrono, invece, interventi strutturali seri e impegnativi dal punto di vista economico, mirati alla salvaguardia sia dei pochi centri abitati disseminati lungo la Quebrada, sia della viabilità (stradale e ferroviaria) e tali da garantire gli scambi con le province e gli stati vicini (Bolivia e Cile).

morphotypes that characterize the present-day terrain.

The erosion processes on the slopes are expressed both as the producing of detritus due to rill and gully erosion and through the triggering of debris flows that feed the fans at the valley bottom, where the tributaries flow into the main collectors, and flood the channels and surrounding river plain.

Often the debris flows are such as to cause the narrowing or even the blocking of the river channels, favoring the formation of dam lakes. When the waters overflow the barrier, they quickly erode the threshold that was formed and begin regressive erosion processes that destroy the barrier and erode any lacustrine sediments deposited upstream from the blockage.

All of this contributes synergically to the production of detritus and the increase in solid transport (especially that on the bottom) found in the rivers, all of which are braided.

Both the debris flows and the enormous solid transport in the rivers and streams are directly responsible for the aggradation found in the channels. This is the dominant process taking place today, which acts in the short term (historic time scale).

The alternation of erosion and sedimentation processes is the result of the delicate equilibrium existing between the rate at which tectonic rising takes place and the rate of sedimentation, controlled above all by climatic conditions and the erodibility of the substratum. If the subarid conditions do not guarantee the reaching of an adequate flow for carrying away the excess solid material coming from the slopes, as is presently the case, aggradation becomes the dominant process.

The aggradation of river channels brings about the presence of riverbeds suspended over their alluvial plains and, therefore, by itself, the hazard of flooding in the surrounding areas; this hazard becomes an actual risk when the flooding affects (as often happens) the towns, roads, and infrastructures and socioeconomic activities in general (including farming, the only activity that truly supports the people living in this area, one of the most economically impoverished in Argentina).

The problem is complex, and there is no easy solution, considering above all the intensity of the phenomena noted and described, which cannot be faced by normal works for mitigating the geologic-hydraulic risks (reforestation, construction of structural works such as reinforcement embankments, deposit areas, structures for intercepting or diverting debris flows, etc.) that remain valid in other climatic and geological conditions, but here prove to be either impossible to carry out or totally ineffective or insufficient to control the intensity of the phenomena.

What is needed instead are serious and economically substantial structural works aimed at the protecting of the few villages scattered along the Quebrada as well as the road network (highways and railroads) so as to safeguard communications with the neighboring provinces and countries (Bolivia and Chile).

The only way to protect the villages consists of the spatial fore-

L'unico modo per salvaguardare i centri abitati consiste nella previsione spaziale dei fenomeni e nella programmazione di un'urbanizzazione che tenga conto della pericolosità dei fenomeni stessi. Gli esempi riportati in questo lavoro mostrano come troppo spesso siano state interessate dall'urbanizzazione aree chiaramente soggette a rischio di inondazione e/o alluvionamento.

Per quanto riguarda invece la viabilità ordinaria, è impensabile arrestare l'evoluzione in atto e le colate detritiche che continuamente mettono in crisi le vie di comunicazione e che hanno portato addirittura alla chiusura della ferrovia. La soluzione che sembra, allo stato attuale, la più perseguibile è quella di evitare le aree più soggette al rischio da colata detritica, costruendo tunnel o, quando possibile, viadotti che permettano di non avere interferenza alcuna con i canali nei quali si concentrano i flussi detritici.

La scelta è abbandonare la Quebrada de Humahuaca al suo destino o salvarla tramite interventi impegnativi e costosi, ma necessari se si vorrà evitare il suo completo degrado.

È opinione di chi scrive che debba essere fatto il possibile per recuperare un'area con enormi potenzialità economiche, dovute soprattutto alla sua vocazione turistica, per la presenza di interessanti siti archeologici e di bellezze naturalistiche uniche al mondo, gli stessi che hanno valso alla Quebrada de Humahuaca, la valle centrale e più importante della Cordillera Oriental, il titolo di "Patrimonio dell'Umanità".

casting of the phenomena and urban planning that takes into account the hazard of these phenomena. The examples given in this work demonstrate how too often areas subject to flooding and/or alluviation are built upon and developed.

As regards instead the road network, to stop the evolution taking place and the debris flows that continuously jeopardize the roads and that led to the shutting down of the railroad is inconceivable. As things now stand, the solution that seems most pursuable is to avoid those areas subject to the risk of debris flows, building tunnels or, when possible, viaducts that make it possible to avoid any interference with the channels in which the debris flows are concentrated.

The choice is whether to abandon the Quebrada de Humahuaca to its fate or to save it by interventions that are difficult and expensive, but necessary if its complete degradation is to be avoided.

It is this author's opinion that everything possible must be done to rehabilitate an area with enormous economic potentialities, due above all to its attractiveness to tourists, the presence of interesting archeological sites and its areas of natural scenic beauty unique in all the world, which have earned the Quebrada de Humahuaca, the central and most important valley of the Cordillera Oriental, the title of "Heritage of Humanity."

OPERE CITATE / REFERENCES

- ACEÑOLAZA F.G. (1973) - *Sobre la presencia de Oldhamia sp. En la Formación Puncoviscana de Cuesta Muñano, Provincia de Salta, República Argentina*. Revista de la Asociación Geológica Argentina, **28** (1): 56-60.
- ACEÑOLAZA F.G. & DURAND F.R. (1973) - *Trazas fósiles del basamento cristalino del noroeste argentino*. Boletín de la Asociación Geológica de Córdoba, **2** (1-2): 45-56.
- ACEÑOLAZA F.G. & TOSELLI A. (1973) - *Consideraciones estratigráficas y tectónicas sobre el Paleozoico inferior del Noroeste Argentino*. Mem. 2° Congreso latinoamericano de Geología, **2**: 755-763.
- AGÜERO P.N. (1986) - *Comentarios acerca de la erosión hídrica en la cuenca del río Grande*. Revista Proyección del Centro de Ingenieros y Agrimensores de Jujuy. Año 1, 1 (San Salvador de Jujuy).
- ALBECK M.E. (1993) - *Los constructores del Pucará de Tilcara. Actas de la VI Reunión de Campo del Cuaternario*. Guía de Campo. Sec. de Cs. y Técnica y Est. Regional. Universidad Nacional de Jujuy (Cadinqua, Pr. de Jujuy, 21-23 Noviembre 1993).
- AHMADA A.L. (2002) - *Periglacial phenomena in the high mountains of northwestern Argentina*. South African Journal of Science, **98**, March/April 2002, 166-170.
- ALLMENDINGER R.W. & ZAPATA T.R. (1996) - *Imaging the Andean structure of the Eastern Cordillera on reprocessed YPF seismic reflection on data*. Actas 13° Congreso Geológico Argentino, **2**: 125-134.
- AMENGUAL R. & ZANETTINI J.C.M. (1974) - *Geología de la quebrada de Humahuaca entre Uquía y Purmamarca (Provincia de Jujuy)*. Revista de la Asociación Geológica Argentina, **29**: 30-40.
- ARAMAYO FLOREZ F. (1989) - *El cinturón plegado y sobrecorrido del Norte Argentino*. Boletín de Información Petrolera, **3**: 2-16.
- AZCUCY C. & CAMINOS R. (1986) - *Diastrofismo en el sistema carbonífero en la República Argentina*. In: ARCHANGELSKY S. (1996, ed.) - *El Sistema Carbonífero en la República Argentina*. Academia Nacional de Ciencias (Córdoba), 228-238.
- BALDIS B., GORROÑO A., PLOSKIEWICZ J.V. & SARUDIAISKY M. (1975) - *Geotectónica de la Cordillera Oriental, Subandinas y comarcas adyacentes*. Actas VI Congreso Geológico Argentino, **1**: 3-22, Buenos Aires.
- BIANCHI A. & YANEZ C. (1992) - *Las Precipitaciones en el Noroeste Argentino (segunda edición)*. Estación Experimental Agropecuaria Salta del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Salta, República Argentina.
- BIANUCCI H., FERNANDEZ GARRASINO C. & SANCHEZ E. (1987) - *Corrimientos de bajo ángulo entre La Quiaca y Abra Pampa (Provincia de Jujuy, Argentina)*. Acta de 10° Congreso Geológico Argentino (San Miguel de Tucumán), **1**: 165-168.
- BOLL A. & HERNANDEZ M. (1986) - *Interpretación estructural del área de Tres Cruces*. Boletín de Información Petrolera. Tercer época, **2**, 7: 2-14.

LA DINAMICA FLUVIAL EN LA CORDILLERA ORIENTAL DE LAS ANDES (ARGENTINA NOROCCIDENTAL)

- BONARELLI G. (1913) - *Las Sierras Subandinas del Alto Aguarague y los yacimientos petrolíferos del distrito minero de Tartagal, Departamento de Orán, Provincia de Salta*. An. Min. Agr. Secc. Geol., **8**, 4.
- BOND M. & LOPEZ G. (1995) - *Los mamíferos de la Formación Casa Grande (Eoceno) de la provincia de Jujuy, Argentina*. Ameghiniana (Publicación del Asociación Paleontológica Argentina), **32** (3): 301-309.
- BRACKEBUSCH L. (1891) - *Mapa geológico del interior de la República Argentina, escala 1:1.000.000*. Actas de la Academia Nacional de Ciencias de la República Argentina en Córdoba, Instituto Geográfico de C. Hellfarth, Gotha.
- BRANDÁN E.M. & VIERA V.O. (1996) - *Morfometría y análisis de procesos erosivos de la cuenca de Huasamayo, Prov. de Jujuy, Argentina*. Memorias del XII Congr. Geol. Boliviano, Tomo 1: 269-280, Tarija (Bolivia).
- BRANDÁN E.M., VIERA V.O. & VIERA L.V. (2005) - *Perfil longitudinal del Río Grande de Jujuy, Quebrada de Humahuaca*. Actas del XVI Congreso Geológico Argentino (La Plata): 521-529.
- BRODTKORB M.K., LANFRANCO J.I. & SUREDA R. (1978) - *Asociaciones minerales y litología del yacimiento Aguilar, Prov. de Jujuy, República Argentina*. Rev. Asoc. Geol. Argentina, **33** (4): 277-298.
- CASTELLANOS A. (1950) - *El Uquiense, sedimentos neógenos de Uquía (Senador Pérez) en la Provincia de Jujuy (Argentina)*. Facultad de Ciencias Matemáticas Físicas Químicas y Naturales de la Universidad Nacional del Litoral. Publ. n. 36, Serie Técnico Científico, 55 pp., Rosario.
- CENCETTI C., RIVELLI F., TACCONI P. & VIGLIONE F. (2001) - *La "Quebrada de Humahuaca" (Bacino del Río Grande de Jujuy, Argentina nord-occidentale): caratteristiche geomorfologiche di un bacino di ambiente andino*. L'Universo, 4 (luglio-agosto): 496-514. ISSN: 0041-0409.
- CENCETTI C., RIVELLI F.R. & TACCONI P. (2004) - *Le colate detritiche nell'Arroyo del Medio (Provincia di Jujuy, Argentina nord-occidentale)*. Proc. of "INTER-PRAEVENT 2004" (Riva del Garda, Trento, 24-28 maggio 2004), **1** (3): 45-56. ISBN: 3-90 11 64-06-5.
- CENCETTI C., RIVELLI F.R. & TACCONI P. (2006) - *Dinamica geomorfologica e problematiche geologico-ambientali nel bacino del Río Purmamarca (Provincia di Jujuy, Argentina nord-occidentale)*. Giornale di Geologia Applicata, 4: 216-212. ISSN: 1826-1256. DOI: <http://dx.doi.org/10.1474/GGA.2006-04.0-27.0155>.
- CHAYLE W. & AGÜERO P.N. (1987) - *Características de remoción en masa en la cuenca del Río Grande. Quebrada de Humahuaca - Jujuy*. Rev. del Instituto de Geología y Minería, Universidad Nacional de Jujuy (República Argentina), 7:24-31.
- CHAYLE W. & CHALABE S. (1990) - *Neotectónica del área San Salvador de Jujuy, Argentina*. XI Congreso Geológico Argentino, Actas, 2: 417-420.
- CHAYLE W., CHALABE S. & SOLIS N. (1990) - *El Río Grande y su evolución en el tiempo geológico*. Actas del Decimo Primer Congreso Geológico Argentino (San Juan, 1990), 1: 400-403.
- CHAYLE W. & OROSCO O.A. (1996) - *Riesgos en la provincia de Jujuy, República Argentina*. XII Congreso Geológico Boliviano 3: 1031-1036.
- CHAYLE W. & WAYNE W.J. (1995) - *Impact of erosion, mass wasting, and sedimentation on human activities in the Río Grande Basin, Jujuy Province, Argentina*. Environmental and Engineering Geoscience, **1**: 403-416.
- CLADOUHOS T.T. (1993) - *Quantitative analysis of faults: Fault kinematics from the Andes of NW Argentina and SW Bolivia, A finite strain method, and a fault growth model*. Ph.D. thesis (Ithaca, New York, Cornell University).
- CLAPPERTON C.M. (1991) - *Influence of tectonics on the extent of Quaternary glaciation in the Andes*. Boletín IG-USP, Publicação Especial, **8**: 89-108.
- COIRA B.L. (1979) - *Descripción Geológica de la hoja 3c, Abra Pampa*. Boletín, 170, 90 pp. Servicio Geológico Nacional, Buenos Aires.
- CONSEJO FEDERAL DE INVERSIONES - Programa "Agua Potable a Pequeñas Comunidades". (APAPC), Jujuy.
- CORTES J., FRANCHI M. & NULLO F. (1987) - *Evidencias de neotectónica en Las Sierras de Aguilar y del Tanque, Cordillera Oriental y Puna Jujeñas, Argentina*. X Congreso Geológico Argentino, Actas, 1: 239-242.
- DIRECCION HIDRAULICA DE JUJUY - *Información pluviométrica en publicaciones internas. Jujuy. República Argentina*.
- FERNANDEZ J., BONDESIO P. & PASCUAL R. (1973) - *Restos de Lepidosiren paradoxa (Osteichthyes, Dipnoi) de la Formación Lumbrera (Eógeno, Eoceno?) de Jujuy*. Consideraciones estratigráficas. Ameghiniana (Publicación del Asociación Paleontológica Argentina), **10** (2), 152-172.
- FRUTOS J. (1981) - *Andean tectonics as a consequence of sea-floor spreading*. Tectonophysics, **72**: T21-T32.
- GARCIA N. (1990) - *Síntesis climatográfica de la República Argentina*. Publ. Fich. UNL 36/90, 31 pp., Santa Fé.
- GEMMELL J.B., ZANTOP H. & MEINERT L.D. (1992) - *Genesis of the Aguilar Zinc-Lead-Silver deposit, Argentina: Contact metasomatic vs sedimentary exhalative*. Econ. Geology, **87** (8): 2085-2112.
- GONZALEZ DIAZ E.F., & FAUQUE L.E. (1987) - *Proveniencia del material componental del torrente de barro de "El Volcán" - Quebrada de Humahuaca (Jujuy - República Argentina)*. Actas del Decimo Congreso Geológico Argentino (San Miguel de Tucuman, 1987), 3: 309-312.
- GRIER M. (1990) - *The influence of the cretaceous Salta rift basin on the development of andean structural geometries NW Argentina - Andes*. PhD Thesis, unpublished (Cornell University, Ithaca, USA).
- HALPERN M. & LATORRE C.D. (1973) - *Estudio geocronológico inicial de rocas del noroeste de la República Argentina*. Revista de la Asociación Geológica Argentina, **28** (2): 195-205.
- HARRINGTON H.J. (1943) - *Las corrientes de barro (mud flow) de "El Volcán", Quebrada de Humahuaca, Jujuy*. Rev. Asoc. Geologica Argentina, Tomo **1** (2): 149-165.
- HARRINGTON H.J. & LEANZA A.F. (1957) - *Ordovician trilobites of Argentina*. Department of Geology, University Kansas Press, Spec. Publ., 1: 1-59.

RIVER DYNAMICS IN THE CORDILLERA ORIENTAL OF THE ANDES (NORTHWESTERN ARGENTINA)

- HERMANN R.L. & STRECKER M.R. (1999) - *Structural and lithological controls on large Quaternary rock avalanches (sturzstorms) in arid northwestern Argentina*. Geol. Soc. of Am. Bull., **5** (3): 934-948.
- HERNANDEZ R., DI SALVO A., PINA A. & CONSTANTINI R. (1991) - *Informe preliminar del área del Río Seco Occidental entre Las Sierras de las Pavas hasta el Río Bermejo*. Publ. Inedita, YPF.
- IGARZABAL A.P. (1982) - *El relieve de la Puna argentina*. Revista del Instituto de Ciencias Geológicas, Universidad Nacional de Jujuy, **5**: 45-66.
- IGARZABAL A.P. & RIVELLI F.R. (1996) - *Incidencia del cono del Arroyo del Medio en el desajuste del río Grande (Quebrada de Humahuaca, Provincia de Jujuy)*. 13° Congreso Geológico Argentino y 3° Congreso Exploración de Hidrocarburos, **4**: 187-199.
- KLEY J. & REINHARDT M. (1993) - *Geothermal and tectonic evolution of the Eastern Cordillera and Subandean Ranges of Southern Bolivia*. In: REUTTER K.J., SCHEUBER E. & WIGGER P.J. (eds) "Tectonics of the Southern Central Andes: Structure and evolution of an active continental margin" (Springer), 155-170.
- LOSS R. & GIORDANA A. (1952) - *Osservazioni sul Proterozoico di Jujuy, Argentina*. Atti della Soc. Ital. di Sc. Nat., **91** (3-4): 141-189.
- MAAS G., MACKLIN M., SPARKS P., MELDRUN E. (1999) - *A geomorphic based record of debris flow events in the catchment of the Arroyo del Medio, northwest Argentina*. DGXII - Commission of the European Communities, "Policies for sustaining environments and livelihoods in mountain areas", Project Working Paper - Prel. Rep. (08/1999), 12 pp.
- MARTIN J.L., SUREDA R. & FLORES F.J. (1994) - *Investigación geoquímica en un yacimiento "sedex" del Ordovícico Inferior: Mina El Aguilar, Jujuy, Argentina (23° 12'S)*. Revista Geológica de Chile, **21** (1): 71-90.
- MATHER K.F. (1922) - *Front ranges of the Andes between Santa Cruz and Emarcación*. Geol. Soc. Amer. Bull., **33**: 709-764.
- MÉNDEZ V. (1975) - *Estructuras de las provincias de Salta y Jujuy a partir del meridiano 65°30 oeste, hasta el límite con las Repúblicas de Bolivia y Chile*. Revista de la Asociación Geológica Argentina, **29** (4): 391-424.
- MÉNDEZ V., TURNER J., NAVARINI A., AMENGUAL R. & VIERA O. (1979) - *Geología de la región noroeste. Provincias de Salta y Jujuy, República Argentina*. Revista de la Dirección General de Fabricaciones Militares, 0-118, Buenos Aires.
- MINETTI J.L. (1999) - *Atlas Climático del NW Argentino*. Laboratorio Climatológico Sudamericano. Fundación Carl C. Zon Caldenius, Sede NOA.
- MINGRAMM A. (1982) - *Geology and hydrocarbons of the thrustbelt between Río Bermejo and Río Pescado*. Informe de YPF n. 7553.
- MINGRAMM A., RUSSO A., POZZO A. & CAZAU L. (1979) - *Sierras Subandinas*. In: TURNER J.C.M. (Ed.) *Geología Regional Argentina*. Academia Nacional de Ciencias, Córdoba, I, 95-138.
- MON R. (1976) - *The structure of the eastern border of the Andes in north-western Argentina*. International Journal of Earth Sciences, **65**, 1: 211-222.
- MON R. & SALFITY J.A. (1995) - *Tectonic evolution of the Andes of Northern Argentina*. In: TANKARD A.J., SUÁREZ R.S. & WELSH H.J. (Editors) - *Petroleum Basins in South America*. Am. Ass. of Petr. Geol., Mem. **62**: 264-283, Tulsa.
- MORENO (1970) - *Estratigrafía y paleogeografía del Cretácico superior en la Cuenca del Noroeste Argentino, con especial mención de lo Subgrupos Balbuena y Santa Barbara*. Revista de la Asociación Geológica Argentina, **25** (1): 9-44.
- PASCUAL R., VUVETICH M.G. & FERNANDEZ J. (1978) - *Los primeros mamíferos (Notangulata, Hericostornidae) de la F. Mealla (Gr. Salta, Subgr. Santa Bárbara) su implementación filogenética, taxonómica y cronológica*. Ameghiniana (Publicación del Asociación Paleontológica Argentina), **5**, 15: 366-390.
- PASTORE F.Y. & GROEBER P. (1936) - *Reconocimiento geológico del torrente de barro llamado Volcán, Valle de Humahuaca, Jujuy*. An. Mus. Nac. Hist. Nat., **36**, Buenos Aires.
- RAFAELLI S., MONTGOMERY D. & GREENBERG H. (1999) - *Procesos Erosivos en la Cuenca del Río Iruya: Zonificación del Territorio en Base a Modelos Topográficos*. Comisión del Río Bermejo, Buenos Aires, Argentina, 22 pp.
- REBORATTI C. (Coordinador) (2003) - *La Quebrada*. La Colmena Ed., Buenos Aires, 245 pp. ISBN: 987-9028-41-4.
- REYES F.C. & SALFITY J.C. (1973) - *Consideraciones sobre la estratigrafía de Cretácico (Subgrupo Pirgua) del noroeste argentino*. Actas del 5° Congreso Geológico Argentino, 3,355-385.
- REYNOLDS J.H., HERNANDEZ R.M., IDLEMAN B.D., NAESER C.W. & GUERSTEIN P.G. (1996) - *Río IRUYA REVISITED: THE NEOGENE TECTONIC DEVELOPMENT OF THE WESTERN SIERRAS SUBANDINAS, SALTA PROVINCE, NW ARGENTINA*. Geol. Soc. of Am., Abstracts with Programs (Denver, CO), **28** (7): A-59.
- SALFITY J.A., OMARINI R.H., BALDIS B. & GUTIERREZ W. (1975) - *Consideraciones sobre la evolución geotectónica del Precámbrico y Paleozoico Inferior del Norte de Argentina*. Actas Segundo Congreso Iberoamericano de Geología Económica, **4**: 341-362, Buenos Aires.
- SALFITY J.A., BRANDÁN E.M., MONALDI C.R. & GALLARDO E.F. (1984a) - *Tectónica compresiva cuaternaria en la Cordillera Oriental Argentina, latitud de Tilcara (Jujuy)*. IX Congreso Geológico Argentino, Actas, **2**: 427-434.
- SALFITY J.A., GORWTOVICH S. & MOYA M. (1984b) - *Las fases diastróficas en Los Andes del Norte Argentino*. Simposio Internacional de "Tectónica Centro-Andina y Relaciones con Recursos Naturales". Comisión Nacional de Estudios Geofísicos, Academia Nacional de Ciencias. La Paz, Bolivia.
- SECRETARÍA DE MINERÍA DE LA NACIÓN, REPÚBLICA ARGENTINA - Sitio Institucional (<http://www.mineria.gov.ar/>).
- SEGEMAR (1998) - *Estudio integrado de la Quebrada de Humahuaca*. Instituto Tecnológico y Geominero de España, Madrid, 77 pp.
- SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL (S.M.N.) - Información pluviométrica y meteorológica, Buenos Aires.
- SOLIS N. (1993) - *Evidencias de Neotectónica en la Cordillera Oriental*. Actas de la VI Reunion de Campo del Cuaternario. Guía de Campo. Sec. de Cs. y Técnica

LA DINAMICA FLUVIALE NELLA CORDILLERA ORIENTAL DELLE ANDE (ARGENTINA NORD-OCCIDENTALE)

- y Est. Régional. Universidad Nacional de Jujuy (Cadinqua, Pr. de Jujuy, 21-23 Noviembre 1993).
- SPENCER F.N. (1950) - *The geology of the Aguilar lead-zinc mine, Argentina*. Econ.Geol., **45** (5): 405-433.
- STARCK D., GALLARDO E. & SCHULTZ A. (1992) - *La discordancia precarbónica en la porción argentina de la cuenca de Tarija*. Boletín de Información Petrolera. Tercera época, **9**, 29: 2-11.
- STEINMANN (1930) - *Geología del Perú*. Carl Winters Universitätsbuchhandlung (Heidelberg). 448 pp.
- SUREDA R.J. & MARTIN J.L. (1990a) - *Mina El Aguilar, Provincia de Jujuy, Rep.Argentina. Un depósito Sedex ordovícico con metamorfismo de contacto sobreimpuesto en la provincia metalogénica quiaqueña*. Contr. Conoc. Mineralogía y Geología Económica Rep. Argentina, AAGE, pub.especial 78-92.
- SUREDA R.J. & MARTIN J.L. (1990b) - *El Aguilar Mine: An ordovician sediment-hosted stratiform lead-zinc deposit in the central Andes*. En: *Stratabound deposits in the Andes*. FONTBOTÉ L., AMSTUTZ G.C., CARDOZO M., CEDILLO E. & FRUTOS J. (eds), Springer, 161-174.
- TRAUTH M.H. & STRECKER M.R. (1999) - *Formation of landslide-dammed lakes during a wet period between 40,000 and 25,000 yr BP in northwestern Argentina*. Palaeogeog., Palaeoclimatol. Palaeoecol., **153**: 277-287.
- TURNER J.C.M. (1959) - *Faunas graptolíticas de América del sur*. Revista de la Asociación Geológica Argentina, **15** (1-2): 1-180.
- TURNER J.C.M. (1960) - *Estratigrafía de la Sierra de Santa Victoria y adyacencia*. Acad. Nac. Cs. Cord. Bol., **41** (2): 163-196.
- TURNER J.C.M. (1963) - *The Cambrian of northern Argentina*. Tulsa Geol. Soc. Digest, **31**: 193-211.
- TURNER J.C.M. & MENDEZ V. (1975) - *Geología del Sector Oriental de los departamentos de Santa Victoria e Iruya, Provincia de Salta. República Argentina*. Boletín Nacional de Ciencias, **51** (1-2): 11-24, Córdoba.
- VIERA V.O. & BRANDÁN E.M. (1997) - *Clasificación supervisada de imágenes TM de la Cuenca del Río Iruya, Prov. de Salta*. Actas IV Simposio Argentino de Teledetección, 78-86, San Juan.
- VILELLA R.C. (1951) - *Acerca del hallazgo del horizonte calcáreo dolomítico en la Puna Salto-Jujeña y su significado geológico*. Revista de la Asociación Geológica Argentina, **6** (2): 101-107.
- YRIGOYEN M. (1979) - *Cordillera Principal. II Simposio de Geología de la República Argentina (Córdoba)*. Academia Nacional de Ciencias, **1**: 651-694.
- ZANETTINI J.C.M. (1973) - *Geología de la comarca de Abra Pampa y Tres Cruces (provincia de Jujuy)*. Revista de la Asociación Geológica Argentina, **28** (4): 331-340.

Received December 2007 - Accepted February 2008