

ZASIĘG I BUDOWLE WULKANICZNE GRUPY ANDAHUA

Extent and volcanic's constructions of Andahua group

Andrzej GAŁAŚ

*Akademia Górniczo-Hutnicza,
Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska,
Katedra Analiz Środowiskowych, Kartografii i Geologii Gospodarczej;
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków;
e-mail: pollux@geol.agh.edu.pl*

Treść: W 2003, 2004 i 2006 roku grupa geologów z Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie prowadziła badania terenowe młodej grupy wulkanicznej Andahua, w południowym Peru. Została ona poznana zaledwie 45 lat temu i do chwili obecnej nie określono definitywnie jej zasięgu i genezy. Największym obszarem i jednocześnie najbogatszym w produkty wulkanizmu grupy Andahua jest rejon Doliny Wulkanów. Lawy zwartą pokrywą wypełniają tę dolinę, między Misahuanca a Ayo na długości około 60 km. W trakcie prac zidentyfikowano około 150 centrów erupcyjnych, w tym: stożki piroklastyczne o wysokości 50–300 m oraz bardziej liczne kopuły i szczeliny lawowe. Morfologia i rozprzestrzenienie skał grupy Andahua wykazują pewne związki z tektoniką i budową geologiczną podłoża.

Słowa kluczowe: lawa, kopuła lawowa, stożek piroklastyczny, grupa Andahua, zagrożenie wulkaniczne

Abstract: In 2003, 2004 and 2006 small groups of geologists of AGH – The University of Science and Technology in Kraków investigated young Andahua volcanic group of Southern Peru. It was identified first some 45 years ago but its extension is not definitely determined yet. The greatest area of the Andahua group, where at the same time the volcanism products are the most common, is the Valley of Volcanoes. This valley, between the Misahuanca and Ayo, is covered by a dense cover of lava, which is about 60 km long. Field work resulted in discovery of about 150 individual emission centres: apparent pyroclastic cones 50–300 metres high, and usually smaller lava domes and vents controlled by fractures. Morphology of the Andahua lava flows coalescing into composite lava fields as well as criteria for their stratigraphy and tectonic controls are given.

Key words: lava flow, lava dome, pyroclastic cone, Andahua group, volcanic hazard

WSTĘP

Przedmiotem badań jest czwartorzędowa grupa wulkaniczna Andahua (*sensu* Caldas *et al.* 1993). Pierwsza wzmianka o niej pochodzi z relacji lotników Shippeego i Johnsona z 1934 roku (Shippee 1934). Za początek badań naukowych należy uznać obserwacje Portocarrero, który opisał formy wulkaniczne w okolicach Andahua w Dolinie Wulkanów (1960)(Fig. 1).

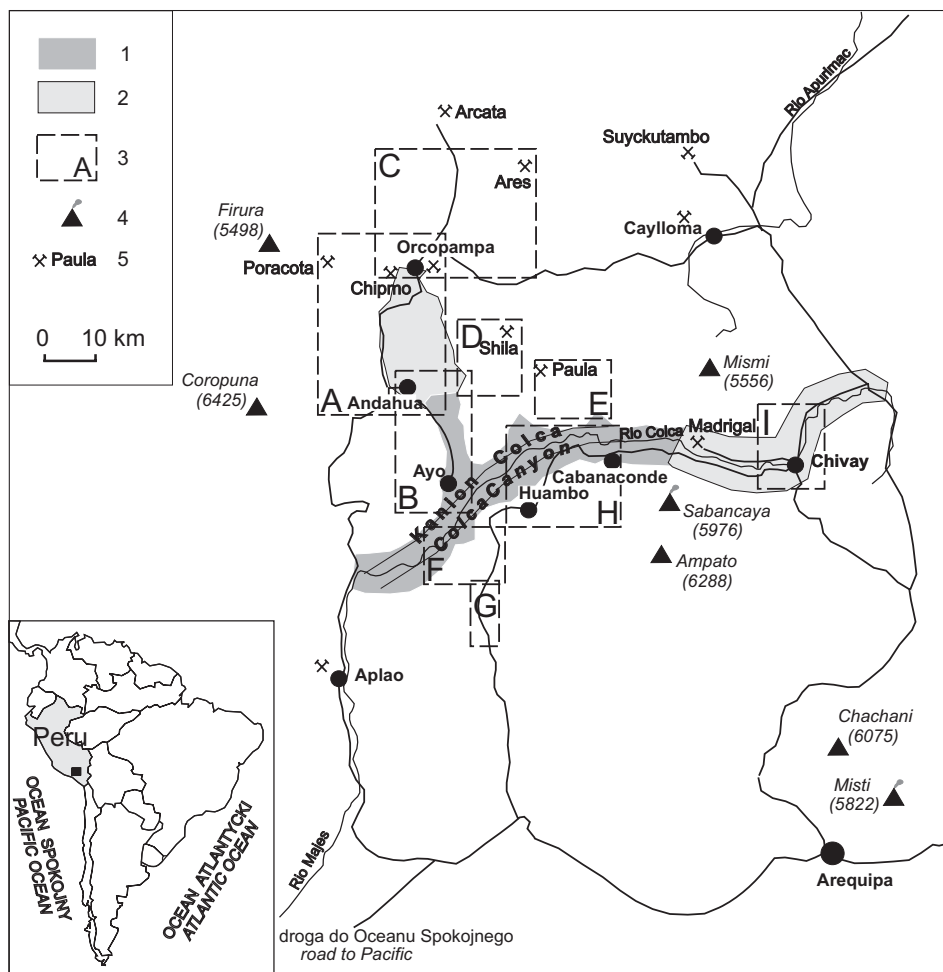


Fig. 1. Mapa okolic Kanionu Colca. 1 – projektowany park narodowy, 2 – strefa buforowa, 3 – rejon występowania grupy Andahua, 4 – stratowulkan, 5 – kopalnia złota; A – część północna Doliny Wulkanów i Dolina Rio Sora, B – część południowa Doliny Wulkanów, C – Antapuna, D – Shila, E – Paula, F – Glorihuasi, G – Legunillas – potok Uchan, H – Huambo – Cabanaconde, I – Chivay

Fig. 1. Canyon Colca region. 1 – national park in project, 2 – buffer zone, 3 – Andahua group occurrence area, 4 – stratovolcano, 5 – gold mine; A – north part of Valley of Volcanoes and Rio Sora Valley, B – south part of Valley of Volcanoes, C – Antapuna, D – Shila, E – Paula, F – Glorihuasi, G – Legunillas – lava flows Uchan, H – Huambo – Cabanaconde, I – Chivay

Wulkany grupy Andahua pozostały niezbadane ze względu na znacznie większe zainteresowanie naukowe i społeczne typowymi dla tej części Andów dużymi stratowulkanami. Do chwili obecnej ukazało się kilkanaście publikacji naukowych, które w sposób wyrywkowy opisują Dolinę Wulkanów lub skupiają się na wrażeniach krajobrazowych (Hoempler 1962, Venturelli *et al.* 1978). Dopiero prace Francuzów dostarczają szczegółowych informacji na temat petrologii i geochemii wulkanitów Andahua (Delacour 2002, Thouret *et al.* 2002). Polskie badania mają na celu określenie genezy i stadium rozwoju grupy Andahua oraz zagrożenia dla obszarów zamieszkałych. Główne pola lawowe były przedmiotem szczegółowych prac, a na mniejszych i peryferyjnych przeprowadzono zwiad terenowy. W 2003 roku miała miejsce wyprawa rekonesansowa pracowników AGH: Andrzeja Gałasia i Andrzeja Paulo. Badania prowadzono także w lipcu 2004 i 2006 roku. W ostatnim roku w pracach terenowych uczestniczyła także studentka Joanna Krupa.

Do tej pory ani centra erupcji, ani zasięg przestrzenny i wiekowy grupy Andahua nie zostały definitywnie określone. Jest to bowiem teren trudno dostępny, na ogół bezwodny, wysokogórski, leżący w strefie 1400–5200 m n.p.m.

W pracach wykorzystano mapy geologiczne Peru w skali 1 : 100 000 (arkusze: Cayarani, Orcopampa, Huambo, Aplao, Cailloma, Chivay) zdjęcia satelitarne (Landsat) i nieliczne zdjęcia lotnicze (Servicio Aerofotografico Nacional, Perú) oraz autorskie fotografie własne i uczestników wypraw w latach 2003–2006. Prace terenowe skupiały się na określeniu miejsc erupcji, charakteru i morfologii utworów wulkanicznych, pobierano próby do badań petrograficznych i wykonywano fotografie. Lokalizację dokonywano za pomocą GPS-u.

Po trzech sezonach badań terenowych można określić z grubsza zasięg przestrzenny grupy Andahua. Wulkany Andahua ciągną się z przerwami na obszarze długości ponad 120 km i szerokości 100 km. Wyodrębniono 9 rejonów gdzie obecne są centra erupcji (Fig. 1). Wyróżniono 37 pól lawowych utworzonych z jednego lub więcej potoków lawy, 46 stożków piroklastycznych i 116 centrów erupcji lawy, w tym kopuły i szczeliny. Największy obszar występowania stanowi Dolina Wulkanów. Grupa Santo Tomas, opisywana przez Moncayo (1994), w dolinie o tej samej nazwie, 70 km na północ od Caylloma, prawdopodobnie odpowiada litostratygraficznie grupie Andahua.

WIEK ERUPCJI

Zasięg wiekowy grupy Andahua jest stopniowo precyzowany. Nie ma wiarygodnych zapisów historycznych aktywności wulkanicznej ani przekazu legendarnego, który potwierdzałby jej młody wiek. Katalog wulkanów Simkina & Sieberta (1994) oraz źródła internetowe powołują się na Sappera (1917), który pisał o aktywności wulkanicznej w czasie panowania Inków (XIV–XVI w.). Dolna granica wiekowa grupy może być określana na podstawie stosunku do rzeźby terenu, osadów glacialnych i rzecznych, objawów tektoniki i erozji oraz pojedynczych, jak dotąd, datowań wieku bezwzględne (Kaneoke & Guevara 1984, Cabrera & Thouret 2000).

Inny sposób pośredniego wnioskowania o wieku stożków wulkanicznych polega na pomiarach ich kształtu. Najstarsze stożki mają wysokość około 100 m. Południowe zbocza są strome, wyrzeźbione erozją lodowca, północne nachylone pod kątem około 10°; powstały one w plejstocenie. Kolejne grupy wiekowe mają zbocza nachylone coraz bardziej – kąt nachyle-

nia zmienia się pomiędzy 21° a 23° u tych, które powstały na przełomie plejstocenu i holocenu poniżej strefy zlodowaczonej. Zbocza stożków powstałych w górnym holocenie mają nachylenie od 28° do 31° (Cabrera & Thouret 2000). Pomiary wykonane przez autora nie znajdują potwierdzenia dla takiego sposobu wyznaczania wieku budowli wulkanicznych. Nachylenie zboczy kilku raczej plejstocenijskich stożków piroklastycznych (Cerro Mauras, Llajuapampa, Marbas Chico Norte) mieści się w przedziale $28\text{--}34^\circ$, co oznaczałoby we wspomnianej klasyfikacji, że są to wulkany powstałe niemal współcześnie. Inną słabą stroną opisaną wyżej morfometrycznej metody datowania jest ograniczenie jej do stożków piroklastycznych. Tymczasem większa część grupy Andahua zbudowana jest z law.

Świeżość niektórych form wulkanicznych, tj. nikłe ślady erozji i wietrzenia oraz brak pokrywy roślinnej wskazują, że powstały one nie dawniej jak 300–400 lat temu. Na starszych popiołach i żuźłowatych lawach grupy Andahua utworzyły się pylaste gleby brunatne, osiągając nawet 0.5–1 metra grubości. Zdomowała się tam, stosownie do strefy wysokościowej, kolczasta trawa *ichu*, *yareta*, kserofity i inne rośliny, a ludzie przekształcili ten obszar w tarasowate pola uprawne. Ponieważ gleby takie rozwijają się pod wpływem wody i dość powoli, a obecnie panuje w tej części Andów klimat suchy, wnioskujemy (Gałaś & Paulo 2005), że powstały one w epoce lodowej i towarzyszących jej cieplejszych okresach tajania lodowców, a więc co najmniej 10 000 lat temu (Thouret *et al.* 2001b). Z badań palynologicznych (Moscol 2001) wynika duża zmienność klimatyczna w czasie holocenu, w tym istnienie młodego okresu wilgotnego. Dowody archeologiczne i geologiczne (Grodzicki 1994) wskazują, że w pierwszym wieku p.n.e., około roku 600 (± 140) i 1000 naszej ery występowały obfite opady atmosferyczne na skutek zjawiska El Niño. Musiałaby wówczas nastąpić znaczna erozja luźnych osadów piroklastycznych.

Przy sporządzaniu mapy tej grupy przyjęto prosty podział na 3 grupy wiekowe: starszą I (plejstocen), pośrednią II (plejstocen–holocen) i młodą III (holocen). Starsza jest zwietrzała, wyrzeźbiona erozyjnie, pokryta roślinnością, często zamieniona na pola uprawne. Bloki lawy są gładkie, a granice dawnych potoków lawy niewyraźne. Zazębiają się one z osadami rzecznoymi, a w strefie wysokogórskiej noszą wyraźne ślady erozji glacialnej i peryglacialnej. Na lawach grupy pośredniej powstały inicjalne gleby, które porastają niekiedy trawy, kaktusy lub krzewy. Powierzchnia młodych law jest chropowata, ostra, miejsca wyciskania lawy czytelne, zbocza potoków lawowych strome, mało stabilne, a struktury płynięcia wyraźne. Rośliny nie zdążyły się zakorzenić.

Kolejnych danych o wieku grupy Andahua dostarczają badania składu izotopowego skał i składu izotopowego węgla w resztkach zwęglonych przez gorący popiół roślin, przeprowadzone przez Kaneoke & Guevara (1984). Najstarsze skały tej grupy, datowane dotąd metodą K-Ar, wskazują na około 800 000–300 000 lat. Jest to zgodne z obserwacjami geologicznymi, według których koło Orcopampa grupa ta zazębia się miejscami z utworami glacialnymi i rozwinęła się po powstaniu kanionów. Lawy blokowały nieraz przepływ rzek. Utwory kilku młodych form, występujących koło Andahua, zbadano metodą ^{14}C . Powstały one w okresie od 4050 do około 370 lat p.n.e. (Cabrera & Thouret 2000), ale z obserwacji kształtu potoków lawy, która opływała badane stożki i do dziś nie porosła kaktusami wynika, że potoki te są jeszcze młodsze. Tak więc lawy mogły płynąć w czasie, gdy Hiszpanie zawojowali imperium Inków i rozpoczął się okres zapisany w kronikach. Prawdopodobnie do Doliny Wulkanów nie dotarł wówczas żaden kronikarz. Poszczególne wulkany Andahua są karłowate i proste w po-

równaniu z wielkimi stratowulkanami południowego Peru. Tajemnica wczesnych stadiów ich rozwoju ukryta jest pod szczelnym płaszczem osadów piroklastycznych ostatniej fazy erupcji. Tylko z rzadka wykop drogowy lub erozja rzeczna wcinają się w stok; wówczas okazuje się, że warstwy lapilli leżą na sobie niezgodnie, a na niektórych rozwinęły się pokrywy zwietrzelinowe. Tym samym niewłaściwe jest nazywanie ogółu tych wulkanów monogenetycznymi (Cabrera & Thouret 2000), gdyż były takie, które wybuchały wielokrotnie.

Jeśli więc jest wiele dowodów na długotrwałą i niedawną aktywność karłowatych wulkanów, to można oczekiwać ich kolejnych wybuchów. Siła sprawcza działa nadal. Jest nią podsuwanie oceanicznej Płyty Nazca pod krę Ameryki Południowej oraz wypiętrzanie Andów i pękanie ich na wielkie bloki tektoniczne (Gałaś & Paulo 2005).

MIEJSCA ERUPCJI

Odnalezienie miejsc erupcji, a jednocześnie dopływu magmy z głębi litosfery ma duże znaczenie w ustaleniu związku aktywności wulkanicznej z budową geologiczną podłoża. Pozwala także na przewidywanie zagrożeń.

Stożek zwieńczony u wierzchołka kraterem, zbudowany z bomb wulkanicznych, lapilli, popiołu oraz płaskich skorup aglomeratu, czyli bryzgów lawy spajających bomby, jest oczywistym miejscem erupcji. Takich wulkanów odnaleziono 46 i zaznaczono wraz z nazwą na mapach (Fig. 2, 3). Niektóre z nich mają rozerwany brzeg, a od krateru rozpoczyna się zakrzepły potok lawy. Większość stożków zbudowana jest tylko z materiału piroklastycznego. Tylko jeden stożek, Gloriahuasi, ma charakter stratowulkanu, tj. zbudowany jest z law i tefry. Stożki piroklastyczne świadczą lokalnie o dużym udziale gazu w magmie. Większość stożków ma wysokość w granicach 100–200 m, wyjątkowo 400 m. Największym wulkanicznym stożkiem była prawdopodobnie Antapuna, której krater i południowe zbocze zostały zniszczone przez lodowiec.

Zwykle stożki znajdują się w obrębie pól lawowych lub z nimi sąsiadują. Wyjątek stanowi grupa wulkanów w rejonie Caylloma, gdzie na wysokim płaskowyżu (4300–5100 m n.p.m.) stoi 6 odosobnionych stożków. Depresje w pobliżu niektórych stożków wypełniają rytmicznie warstwowane popioły wulkaniczne. Miąższość pokrywy piroklastycznej odślonięta w wąwozach i skarpach drogowych rzadko przekracza 5 m.

Większość potoków lawy zaczyna się od kopuły lawowej, z krateru lub też krótkiego stromobocznego grzbietu. Małe kopuły ułożone są nieraz w jednej linii, co wskazuje, że lawa była wyciskana ze szczeliny. Przykładem jest równoległa do przebiegu Kanionu Colca linia kopuł przy drodze Cabanaconde – Huambo. Większe kopuły zawierają kilka szczelin, z których wachlarzowo wyciskana była lawa, lecz po kilkunastu metrach od miejsca wypływu pękała na bloki i powierzchnia potoku przybrała postać rumowiska. Wierzchołki niektórych kopuł zawierają stromoboczną depresję, powstałą na skutek cofnięcia się ostatnich porcji magmy do gardzieli, po spadku ciśnienia w systemie wulkanicznym.

Kopuły i szczeliny erupcyjne przeważają ilościowo nad stożkami piroklastycznymi – odnaleziono ich 116. Wszystkie zaznaczono na mapach (Fig. 2, 3). Z reguły dają one początek potokom lawowym, które mają długość 0.5–10 km. Grubość tych potoków wynosi na ogół 10–30 m, a gdy nakładają się na siebie lub piętrzą u frontu – odpowiednio więcej. Kopuły lawowe wznoszą się na wysokość 20–150 m.

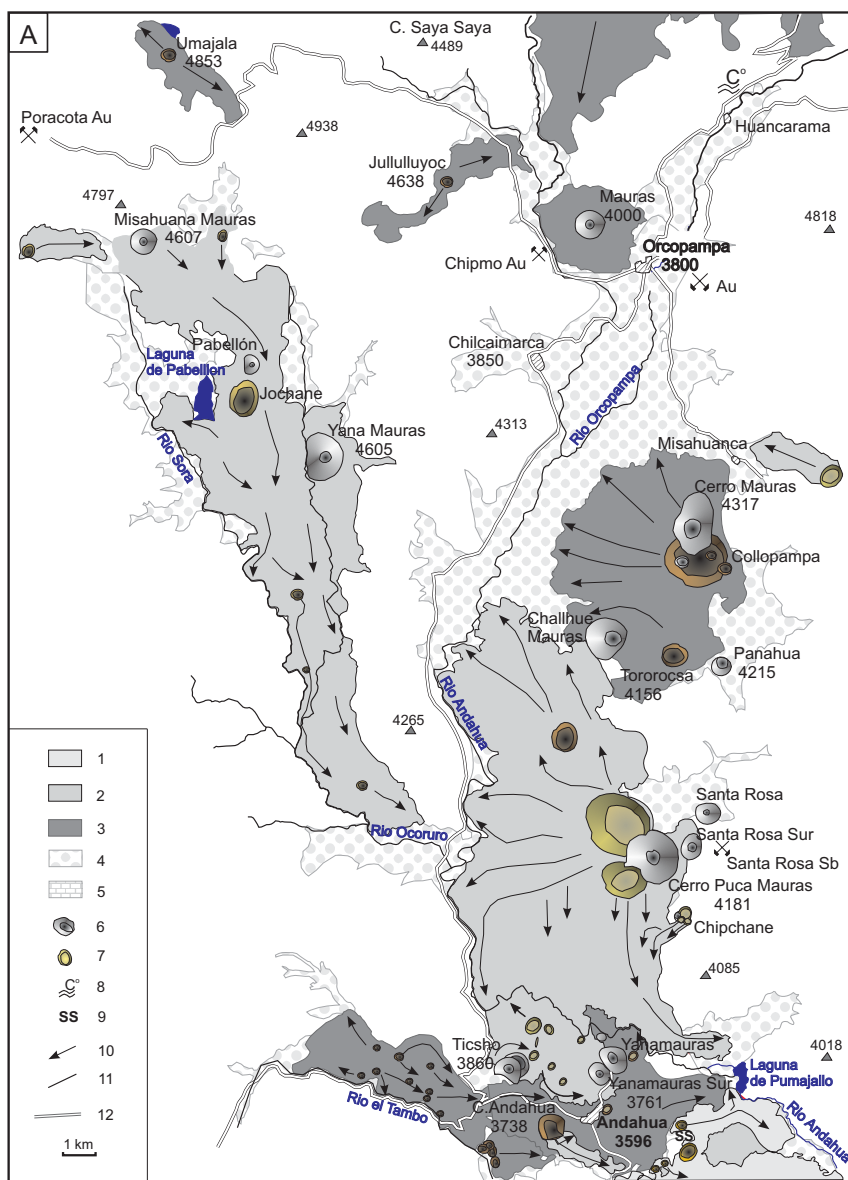


Fig. 2. Zasięg grupy Andahua w północnej części Doliny Wulkanów i Doliny Rio Sora (A). 1–3 grupa Andahua (1 – holocen, 2 – plejstocen–holocen, 3 – plejstocen), 4 – aluwia czwartorzędowe, 5 – trawertyny (czwartorzęd), 6 – stożek piroklastyczny, 7 – kopuła lawowa, 8 – źródła termalne, 9 – naloty siarki rodzimej, 10 – kierunek płynięcia lawy, 11 – uskoki, 12 – droga

Fig. 2. Andahua group at north part of Volcanic's Valley and Rio Sora Valley (A). 1–3 Andahua group (1 – Holocene, 2 – Pleistocene–Holocene, 3 – Pleistocene), 4 – alluvia (Pleistocene–Holocene), 5 – travertines (Pleistocene–Holocene), 6 – piroclastic cone, 7 – lava dome, 8 – hot springs, 9 – native sulphur, 10 – lava flow direction, 11 – fault, 12 – road

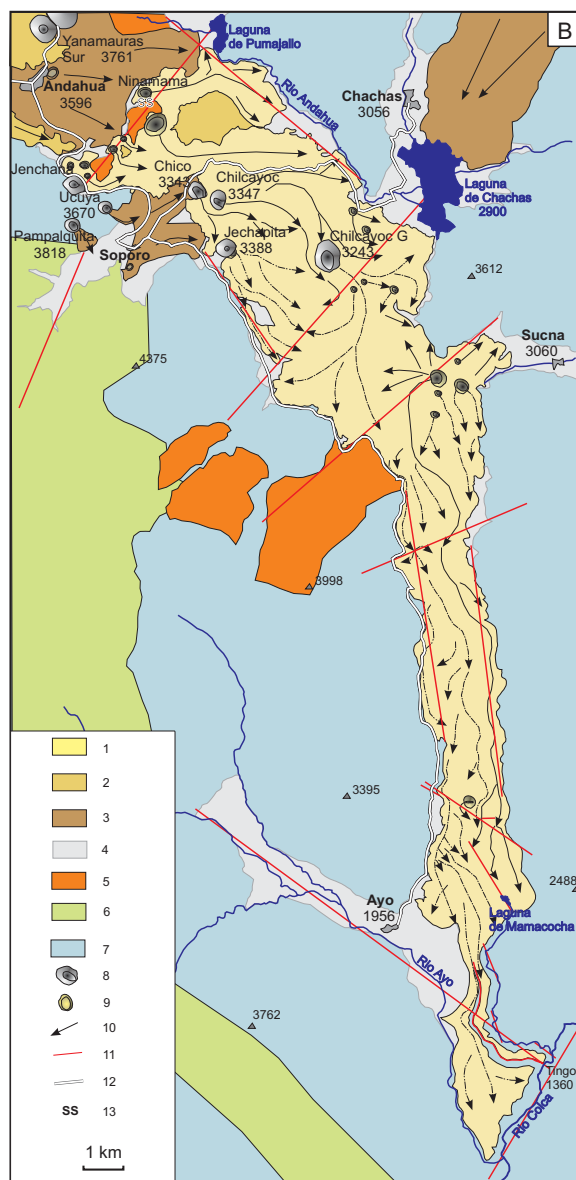


Fig. 3. Mapa geologiczna południowej części Doliny Wulkanów (B). 1–3 grupa Andahua (1 – holocen, 2 – holocen–plejstocen, 3 – plejstocen), 4 – aluwia czwartorzędowe, 5 – grupa wulkaniczna Barroso (pliocen), 6 – skały osadowe (dolna kreda), 7 – skały osadowe (jura), 8 – stożek piroklastyczny, 9 – kopuła lawowa, 10 – kierunek płynięcia lawy, 11 – uskoki, 12 – droga, 13 – naloty siarki rodzimej

Fig. 3. Geological map of south part of Valley of Volcanoes (B). 1–3 Andahua group (1 – Holocene, 2 – Pleistocene–Holocene, 3 – Pleistocene), 4 – alluvia (Pleistocene–Holocene), 5 – Barroso group (Pliocene), 6 – sedimentary rocks (Lower Cretaceous), 7 – sedimentary rocks (Jurassic), 8 – piroclastic cone, 9 – lava dome, 10 – lava flow direction, 11 – fault, 12 – road, 13 – native sulphur

Najwyższą kopułę znaleziono obok kopalni złota Paula; jest to Cerro Coropuna (5170 m n.p.m.) o wysokości względnej 250 m. Powierzchnia i objętość potoków lawowych jest zatem znacznie większa niż stożków piroklastycznych; stanowią one około 97% objętości grupy Andahua.

ROZPRZESTRZENIE

Obszar występowania grupy Andahua można podzielić na 9 rejonów (Tab. 1). Podziału dokonano na podstawie związków z budową geologiczną i morfologią podłoża i granice rejonów należy traktować umownie.

Tabela (Table) 1

Charakterystyka ilościowa rejonów występowania grupy Andahua

Quantitative characteristics of volcanic fields belonging to Andahua group

Rejony <i>Regions</i>	Pola lawowe <i>Lava fields</i>	Stożki piroklastyczne <i>Piroclastic cones</i>	Kopuły i kratery lawowe <i>Lava domes and craters</i>	Wiek*) <i>Age</i>
Dolina Wulkanów <i>Valley of Volcanoes</i>	10	19	45	I, II, III
Dolina Rio Sora <i>Rio Sora Valley</i>	4	3	8	I, II
Antapuna	4	4	3	I
Shilla	1	2	2	I
Rio Mollocco	3	1	9	II
Caylloma	0	6	0	II
Gloriahuasi	5	10	16	I, II
Huambo-Cabanaconde	6	1	25	I
Chivay	3	0	11	I, II
Suma <i>Total</i>	37	46	116	

*) I – plejstocen (*Pleistocene*), II – plejstocen – holocen (*Pleistocene – Holocene*), III – holocen (*Holocene*)

Dolina Wulkanów

Największym obszarem i jednocześnie najbogatszym w produkty wulkanizmu grupy Andahua jest rejon Doliny Wulkanów. Dolina Wulkanów ma długość około 90 km i generalnie przebieg południkowy. W środkowej części, na długości około 30 km, oś doliny jest skrzyżowana na NW-SE. W górnej części, gdzie leży górnicze miasteczko Orcopampa, dno doliny jest na wysokości 3800 m n.p.m. Natomiast ujście doliny do Kanionu Colca znajduje się na wysokości 1360 m n.p.m. Góry otaczające dolinę mają wysokość 3500–5000 m n.p.m. Rejony Rio Sora i Shilla zostały omówione osobno, choć należy je traktować jako subrejony Doliny Wulkanów.

Lawy wypełniają zwartą pokrywę Doliny Wulkanów między Misahuanca a Ayo na długości około 60 km. Wydaje się, że najstarsze erupcje miały miejsce w okolicach Andahua (Fig. 2). Lawy I generacji wypływały z kopuł zlokalizowanych w centrum doliny. 300 m na

NE od Plaza de Armas w Andahua, znajduje się wzgórze, które może być jednym z miejsc efuzji law tej generacji. Ze względu na liczne tarasowe uprawy rolnicze odczytanie poszczególnych centrów i kierunków płynięcia jest obecnie bardzo trudne. Z pewnością jeden z potoków spłynął w kierunku miejsca, gdzie znajduje się obecnie Laguna de Pumajallo. Nieco młodsze pole lawy powstało na zachód od Andahua, w bocznej dolinie Rio Tambo, którą prowadzi droga do Viraco. Dziewięć centrów erupcji było położonych w dnie tej odnogi, około 500 m powyżej Andahua. Lawy pokryły dno doliny, zalały częściowo pampę w jej górnej części i spłynęły w stronę Doliny Wulkanów nakładając się na starsze pole law Andahua. Strumień El Tambo wciną się obecnie pomiędzy brzeg doliny i pokrywą law. Dolina ma charakter rowu tektonicznego o azymucie 300° . Nieco powyżej na stoku na jego południowej krawędzi zaznacza się jeszcze jedno nieduże pole. Wypływ law nastąpił z 4 kopuł, które obecnie mają kształt regularnych, stykających się ze sobą, kraterów lawowych. Niewykluczone, że było to kiedyś jedno duże centrum erupcji, które zapadło się, a następnie – już z mniejszą energią – emitowało lawę mniejszymi kraterami pasożytniczymi.

Zbliżone wiekowo jest kolejne pole, na którym zbudowana jest wioska Soporo położona 8 km od Andahua, w dół doliny (Fig. 3). Podobnie jak pole El Tambo, pole Soporo wypełnia boczną dolinkę o osi prostopadłej do Doliny Wulkanów. Zaobserwowano tu trzy centra erupcyjne. Powyżej wioski znajduje się mocno zerodowana kopuła, z której lawy spływały w stronę Doliny Wulkanów. Pozostałe dwa centra znajdują się na grzbiecie, który ogranicza dolinkę od NW. Wznosi się on około 400 m nad wioskę Soporo. Lawy spływały z niego po stoku na SE. Po wypłynięciu lawy, erupcja przybrała charakter wybuchowy i utworzyły się dwa stożki piroklastyczne Pampalquita i Ucuya.

Najmłodsze pole tej fazy – pole Misahuanca powstało około 15 km na północ od Andahua (Fig. 2). Centra erupcji były przywiązane do wschodniej krawędzi rowu, jaki tworzy Dolina Wulkanów. Lawy wylewały się na zachód i częściowo przegrodziły dolinę. Ponieważ lawy spływały na poziomą pampę, doszło do spiętrzenia potoków, które nawarstwiając się utworzyły grubą na ponad 100 metrów pokrywą o powierzchni około 40 km^2 . Główne centrum miało z pewnością kilka dużych faz erupcji. Obecnie można zaobserwować ślady po zapadniętej strukturze, w której widać odnowione małe kopuły Collopampa i Achacara (Smoll *et al.* 1997). Mogła to być grupa kopuł lub jedna duża kopuła. Zachowały się w niej trzy kratery; w zachodnim znajduje się odnowiony stożek piroklastyczny. Jest to stożek piroklastyczny usypany na stoku, z zachodnim zboczem stanowiącym pozostałość po starszym stożku, którego krater był o kilkadziesiąt metrów na zachód. Zwieńczeniem tego centrum jest wulkan Cerro Mauras o wysokości względnej 170 m. Zbocza wulkanu mają nachylenie 28° . Druga kopuła – Tororoca – położona bardziej na południe, była znacznie mniejsza. W jej sąsiedztwie znajdują się dwa stożki piroklastyczne – Challhue Mauras i drugi nazwany roboczo Rogalikiem. Challhue Mauras jest typowym monogenicznym stożkiem, nieco starszym od law, które opływają go tworząc formę przypominającą kołnierz. Drugi mniejszy wulkan wybuchł niemal poziomo w kierunku północy. Szczątki obwałowania krateru tworzą formę zbliżoną wyglądem do barchanu.

Prawdopodobnie podobny wiek (I generacja) ma pokrywa lawowa na zachód od Orcopampy, na której szczycie stoi wulkan Mauras (4000 m n.p.m.). To izolowane pole lawowe zamyka paleodolinę Rio Chilcaymarca przykrywając częściowo aluwia (Mayta *et al.* 2002), a później spychając rzekę ku południowemu brzegowi doliny. W strefie przełomu znajdują się zabudowania podziemnej kopalni złota Chipmo. Lawy tego pola mają miąższość około 100 m

i powierzchnię 6 km². Materiał piroklastyczny ze stożka Mauras jest przedmiotem okresowej eksploatacji i służy do budowy dróg.

Pole lawowe Santa Rosa, położone na południe od pola Misahuanca (Fig. 2) należy już do II generacji. Lawy pokrywają całą szerokość doliny (4–6 km) na długości 16 km, pomiędzy polami Misahuanca a Andahua. Rzeka Andahua płynie pomiędzy zachodnim brzegiem doliny – zbudowanym od północy z jurajskich wapieni, wulkanitów grupy Orcopampa, a następnie kredowych kwarcytów – a lawami. Rzeka w dolnej części pola skręca ostro na wschód i wycina głęboki na około 50 m wąski kanion w lawach farmacji Andahua. Następnie niknie wśród law, z których wypływa na przeciwnym brzegu doliny, tworząc koło wulkanu Yanamuras Norte wodospad. Dalej płynie już wzdłuż wschodniego brzegu doliny do Laguny de Pumajallo, a następnie Laguny de Chachas. Główne centra erupcji znajdują się przy wschodniej krawędzi doliny koło nieczynnej kopalni rud antymonu Santa Rosa. Wydaje się, że ta erupcja była najmocniejsza w Dolinie Wulkanów. Pokrywa ma powierzchnię około 100 km². Lawy wypływały z trzech dużych kopuł, największa o średnicy ponad 2 km. Lawy rozplynęły się promieniście na północ, zachód i południe tworząc grubą na ponad 100 m pokrywę z licznymi lobami potoków. Najdłuższy potok ma długość około 10 km i szerokość 2 km. Niewielki krater lawowy Chipchane powstał na stoku ponad dnem doliny. Lawy z tego krateru spływają na powierzchnię pola lawowego. Najmłodsze erupcje utworzyły trzy stożki piroklastyczne, w tym największy w Dolinie Wulkanów – Cerro Puca Mauras. Stożek ma wysokość 350 m, krater o średnicy 300 m i głębokości 80 m. Brzeg krateru posiada głęboką na 50 m depresję, przez którą wylała się lawa. Pozostałe dwa stożki Santa Rosa i Santa Rosa Sur są znacznie mniejsze i mają charakter monogeniczny.

Druga strefa występowania centrów erupcyjnych na polu Santa Rosa znajduje się na południe od Kanionu Rio Andahua (Fig. 2). Kopuły i wulkany są znacznie mniejsze i rozrzucone na całej szerokości doliny. Zlokalizowano tu dwie duże i pięć małych kopuł lawowych oraz szczelinę erupcyjną o długości kilkuset metrów. Na brzegach tego pola znajdują się cztery stożki: Ticscho, Yanamauras, Norte i Sur oraz mocno zniszczony wybuchem mniejszy stożek położony nad samym Kanionem Rio Andahua. Ticscho jest podcięty od SW przez przepływającą okresową rzekę. Na zboczach bliźniaczych Yanamauras mieszkańcy Andahua, poprowadzili akwedukty.

Prawdopodobnie do tego samego epizodu erupcji wulkanicznych w dolinie należy kopuła lawowa Cerro Andahua z kraterem i ponad 2-kilometrowej długości stromobocznym potokiem (Fig. 2), w którym zachowały się wały boczne. Jest on położony na starszym polu lawowym, ale jest od niego wyraźnie młodszy. Wewnątrz krateru znajduje się młodsza odnowiona kopuła, z której wypłynął potok lawy, a następnie kopuła zapadła się i powstał mniejszy krater. Kopuła Cerro Andahua ma wysokość nieco ponad 100 m i głębokość 50 m. Ściany krateru zbudowane są z law, niewielkiej ilości bomb piroklastycznych i czerwonej scorii. W lawach znaleziono liczne porwaki kwarcytów, pochodzące z podłoża doliny. W odróżnieniu od starszych potoków ten ma profil charakterystyczny dla law spływających w dół po stoku. Przy odgazowaniu powierzchnia i brzegi krępeły szybciej niż jego wnętrze. Ma więc charakterystyczny przekrój poprzeczny – strome zbocza zewnętrzne (na ogół o wysokości 20–40 m) przechodzące w wąskie grzbiety najeżone kilkumetrowymi blokami lawy. Środek potoku tworzy depresję 10–20 m poniżej brzegów. Tą depresją płynęła szybciej niż przy brzegach rzeka lawy, która tracąc gaz krępeła i pękała tworząc żuźłowate bloki. Owe bloki, transportowane jak kora na rzece, spiętrzały się u czoła stygnącego potoku. Jednocześnie opadał

poziom lawy w górnej i środkowej części potoku względem znieruchomiałych brzegów. Podobne cechy mają także inne potoki młodszych generacji, które spływały w terenie o większym nachyleniu.

Samotna kopuła lawowa II generacji znajduje się na wschód od wioski Misahuanca (Fig. 2). Lawy wypełniają tu niewielką zawieszoną dolinkę.

Południową część Doliny Wulkanów, aż do połączenia z Kanionem Colca, pokrywają lawy najmłodszej – III generacji tworząc pole lawowe Chilcayoc (Fig. 3). W segmencie NW, między wulkanami Jenchaña i Ninamama a Chilcayoc Grande, lawy mają nieco młodszą powierzchnię od tych położonych dalej na południe. Rzeka Andahua przeciska się tu pomiędzy wschodnim brzegiem doliny, zbudowanym z mezozoicznych formacji osadowych, a pokrywają lawową. Brzeg doliny zbudowany z jurajskich wapieni stanowi aktywną krawędź rowu tektonicznego, o czym świadczy zniszczony betonowy most (zbudowany w roku 2000), którego przyczółki odsunęły się powodując, że konstrukcja została złamana i spadła do koryta rzeki. W okolicy Chachas przebiega uskok poprzeczny, dolina traci na nachyleniu, a w okolicy Sucna zaryglowana jest kopułami lawowymi. Rzeka usypuje stożek napływowy i tworzy jezioro zaporowe (Laguna de Chachas). Następnie Rio Andahua niknie pod potokami lawowymi. Nieoczekiwanie po 18 km wypływa spod law tworząc Lagunę de Mamacocha i krótki przełomowy odcinek do Tingo nad Rio Colca.

Erupcje miały miejsce w górnej części tego pola lawowego. Najbardziej na północ następowały wzdłuż linii uskoku przecinającego w poprzek Dolinę Wulkanów. Uskok jest schodowy, ze skrzydłem zrzuconym o około 40 m na SE. Wzdłuż uskoku pojawiają się wychodnie neogeńskie grupy wulkanicznej Barroso otoczone z północy lawami I generacji pola Andahua. Lawa wydostawała się, co najmniej w 7 miejscach, tworząc kopuły zasilające potoki. Ze względu na stromy próg uskoku lawa wypiętrzała się tworząc od północy stromy, nawet 30-metrowy półkolisty wał (Fig. 4) i spływała na SE w formie dość stromobocznego potoku.



Fig. 4. Kopuła i potok lawowy Ninamama widziane z północy

Fig. 4. Ninamama lava dome and flows from north

Największy z potoków, Ninamama, ma długość około 4 km i szerokość 1 km. Na powierzchni potoku występują ostrokrawędziste bloki i iglice lawy *aa*. Ze szczeliny źródłowej na krawędzi kopuły wydobywa się siarkowodór, a na spękanej lawie wytrąciła się siarka rodzima i gips.

Na innym potoku z tej strefy, na NW od stożka piroklastycznego Jenchaña (Fig. 3), znajduje się porzucona osada o nazwie Antaymarca. Pozostałości domów i chodniki ułożone z płyt lawy Andahua porastają rzadkie kaktusy. Według polskiego archeologa M. Sobczyka (inf. ustna) osada powstała najwyżej 200–300 lat temu. Wydaje się, że ludzie zasiedlili te obszary wkrótce po zakończeniu działalności wulkanicznej. W jednostronnie otwartym kraterze wulkanu Jenchaña miejscowa ludność zbudowała *corral* do ćwiczenia byków na *corridę* (Fig. 5).



Fig. 5. Wnętrze krateru wulkanu Jenchaña

Fig. 5. Inside Jenchaña volcanic crater

Kolejna strefa centrów erupcyjnych znajduje się około 2 km na SE, u wylotu bocznej doliny, gdzie znajduje się wioska Soporo (Fig. 3). Najstarszym z nich wydaje się być wulkan Jechapita, który stanowi przykład idealnego stożka piroklastycznego. Wulkan stoi na miejscu wcześniejszego wypływu lawy o czym świadczą wyraźne struktury płynięcia dwóch niewielkich potoków. Dwa mniej regularne stożki piroklastyczne stojące nieco w górę Doliny Wulkanów, tj. Chico i Chilcayoc są rozerwane przez potoki lawy, które z nich wypłynęły i otoczyły Jechapitę (Fig. 6). Kolejny stożek – Chilcayoc Grande – znajduje się w odległości 3 km w dół doliny. Także z tego wulkanu wypływała lava. Jest to największy stożek na tym polu lawy. Ma 140 m wysokości i owalny krater głęboki na około 60 m. Opływają go potoki law III generacji. W bliskim sąsiedztwie wulkanu znajduje się pięć niedużych kopuł lawowych.



Fig. 6. Wulkan Jechapita w otoczeniu najmłodszej generacji law. W tle po lewej wulkany Chico i Chilcayoc, z potokami lawy

Fig. 6. Jechapita volcano and the youngest lava flows. At the left Chico and Chilcayoc volcano with lavas

Na przedpolu bocznej doliny, w której znajduje się osada Sucna, znajduje się jeszcze jedna grupa centrów erupcji. Wyróżniono tu dwie duże i trzy mniejsze kopuły lawowe. Najwyższa z kopuł wznosi się 70 m ponad dno bocznej doliny, do której wpłynęły lawy. Dno doliny podnosi się łagodnie na NE i lawy wpłynęły tylko kilometr w głąb tarasując jej połączenie z Doliną Wulkanów. Natomiast pozostałe potoki wypływały promieniście zalewając lawą Dolinę Wulkanów. Największa objętość lawy spłynęła w stronę Kanionu Rio Colca tworząc potoki o długości przeszło 20 km. Lawa była bardziej płynna i utworzyła wały przypominające moreny boczne lodowca. Szerokość potoku rzadko przekraczała 1 km. Potoki spływały po progach dwóch uskoków poprzecznych do osi doliny tworząc na nich krótkie kaskady z charakterystycznymi *levee*. Powierzchnia tych potoków jest zaczerwieniona być może wskutek wietrzenia w strefie cieplejszego klimatu, jaki panuje na wysokości poniżej 2500 m n.p.m. Poniżej Ayo, potoki lawy są pocięte młodymi uskokami podłużnymi, które ciągną się do samego Kanionu Colca. Na ścianach uskoków, m.in. nad Laguną de Mamacocha, spod cienkiej tu grupy Andahua odsłania się starsza grupa wulkaniczna Barroso.

Dolina Rio Sora

Dolina Rio Sora ma założenia tektoniczne i jest bocznym odgałęzieniem segmentu Andahua–Orcopampa (Fig. 2). Leży na przedłużeniu środkowego segmentu Doliny Wulkanów i ma podobny przebieg. Górna część doliny Rio Sora jest płaska i tworzy rozległą pampę na wysokości 4400–4600 m n.p.m. Rzeka Sora płynie początkowo leniwie, tworząc szerokie rozlewi-

ska. Następnie wskutek zatarasowania dna doliny przez lawy grupy Andahua wcina się pomiędzy lawy a zachodni brzeg doliny tworząc kręty przełom. W tym przełomie następuje połączenie z rzeką Ocoruro, która wpada do Rio Andahua.

Najstarsze erupcje (I generacja) miały miejsce na grzbietach otaczających Dolinę Rio Sora od północy. Są to dwie nieduże kopuły: Umajala i Jullulluyoc. W obu przypadkach doszło do wypływu na samym grzbiecie, co spowodowało, że lawy spływały po obu jego stronach. Kopuła Umajala znajdowała się w strefie oddziaływania lodowca, stąd potoki są zniszczone i odsłaniają się ich wnętrza zbudowane z law masywnych. W kopule Jullulluyoc zachował się kształt krateru lawowego a potoki zachowały nawet charakterystyczne *levee*. Długość potoków dochodziła do 1.5 km.

Następnie doszło do erupcji (II generacja) w dnie doliny, prawdopodobnie najpierw w jej górnej części. Lawy wypływały z co najmniej trzech centrów (Fig. 2). Obecnie widoczne są dwa, a w miejscu trzeciego stoi stożek piroklastyczny Misahuana Mauras. Potoki rozlewały się szeroko po pampie, a następnie spływały w dół w kierunku Doliny Wulkanów. Na wysokości Laguny Pabellón pole lawowe rozszerza się na całą szerokość doliny (6 km). Znajdują się tu kolejne centra erupcji – kopuła Jochane i dwa stożki Pabellón i Yana Mauras. W dół doliny pojawiają się kolejne mniejsze kopuły, które jednak z powodu częściowej erozji i pokrycia roślinnością są mniej czytelne. Mogą to być miejsca wypływu lawy z zastygłego potoku typu *tumulus*. Pole lawy ma łącznie długość 20 km i szerokość 1–6 km.

Antapuna

Masyw Antapuna zamyka od północy Dolinę Wulkanów (Fig. 7). Południkowy rów Andahua – Orcopampa przechodzi tu w mniejszy rów Rio Huarcarama o przebiegu NE-SW. Wulkany Andahua tworzą wyspę czapy na zrębach wyniesionych ponad 4500 m n.p.m., tj. 700–1000 m ponad dno doliny. Największa z nich otacza relikty stożka Antapuna (4890 m n.p.m.). Inne tworzą kopuły lawowe w źródłowej części Rio Umachulco, koło kopalni Arcata oraz mieszane formy piroklastyczno-lawowe koło kopalni Ares. Wydaje się, że są to utwory I generacji. Największe centrum erupcyjne – Antapuna wznosi się około 1000 metrów ponad dno Doliny Wulkanów. Wskutek silnej erozji glacialnej zachowały się tylko fragmenty dużego, słabo nachylonego stożka, który mógł mieć średnicę ponad 4 km. Na południowy wschód od tego krateru widać ślady stożka pasożytniczego. Lawy wypływały promieniście, na niemal płaski obszar, tworząc pokrywę o powierzchni przeszło 80 km². Wydaje się, że zasilanie następowało także z kopuły Tanca. Przejawem zjawisk postwulkanicznych są źródła wód termalnych w Huancarama, które znajdują się w odległości 6 km na południe od szczytu Antapuny.

Znacznie mniejsze centrum erupcyjne o tej samej nazwie – Cerros Antapuna – położone jest bardziej na zachód nad Doliną Umachulco (Fig. 7). Lawy tworzą dość płaską pokrywę podciętą przez rzekę Umachulco. Pokrywa ma 1.5 km szerokości i około 6 km długości.

Kolejne centra erupcyjne znajdują się koło kopalni złota Ares, na stokach Cerro Cajchaya (Fig. 7). Stwierdzono tam jedną kopułę i dwa stożki piroklastyczne. Wszystkie formy są mocno zniszczone przez lodowiec. Najbardziej na wschód położony stożek został częściowo zniszczony, a następnie woda z ustępującego lodowca wypłukała luźny materiał, pozostawiając w formie ostańców fragmenty stożka zbudowane ze spieczonych bomb i aglomeratów. Materiał wulkaniczny na przedpolu lodowca nosi ślady geliflukcji i ma wyraźne struktury poligonalne. Na masywnych lawach, które wypływały z kopuły, są wyraźne rysy lodowcowe.

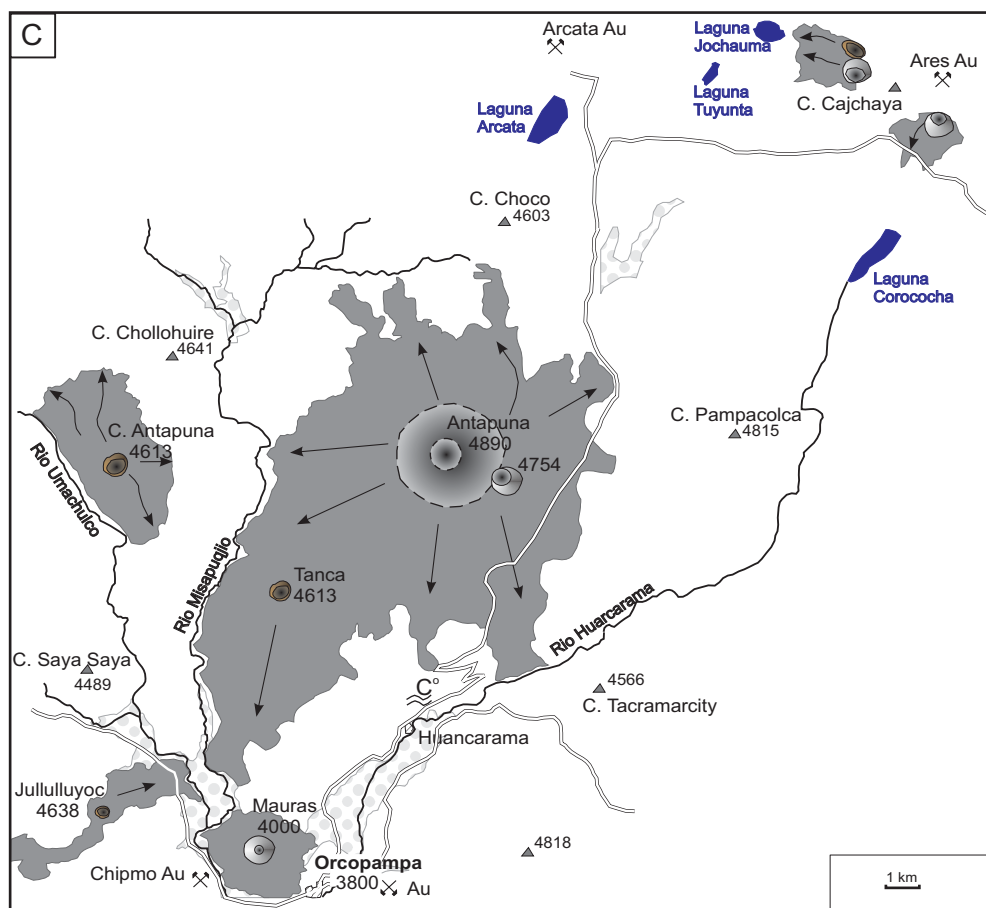


Fig. 7. Zasięg grupy Andahua w rejonie Antapuna (C). Objasnienia jak do figury 2

Fig. 7. Andahua group at the region of Antapuna (C). Explanations – see figure 2

Na północ od tego obszaru znajdują się jeszcze dwa wystąpienia tej grupy wulkanicznej, która pomimo podobnej formy i wieku została nazwana grupą Santo Tomás (Moncayo 1994). Formy te nie zostały uwzględnione w niniejszej pracy.

Shila

Postrzępiony masyw górski Shila (Chila), będący reliktem mioceńskiej kaldery Huayta (Marcoux *et al.* 1998, Paulo & Gałaś 2005) tworzy północno-wschodnie obramowanie Doliny Wulkanów. Obszar powyżej 5300 m n.p.m. jest pokryty wiecznym śniegiem. W masywie Shila działa kopalnia złota i srebra, która ma wyrobiska nawet na wysokości 5200 m.

W pobliżu wyrobisk kopalni, znajdujących się w przeobrażonych skałach wulkanicznych formacji Orcopampa, rozpoznano najwyższe położone centra erupcyjne grupy Andahua (Fig. 8). Są to dwie kopuły lawowe i stożek piroklastyczny Tiella (5300 m n.p.m.).

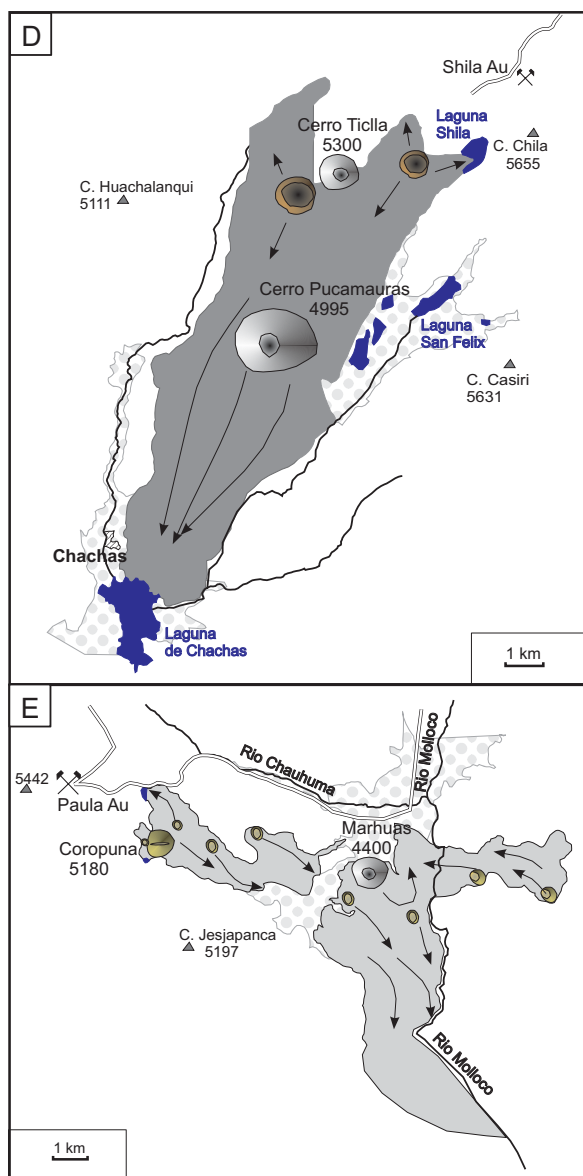


Fig. 8. Zasięg grupy Andahua w rejonie kopalni Shila (D) i Paula (E). Objaśnienia jak do figury 2

Fig. 8. Andahua group at the region mine Shila (D) and Paula (E). Explanations – see figure 2

Lawy należą prawdopodobnie do I generacji. Wszystkie formy noszą wyraźne ślady erozji glacialnej. Potok masywnych law widoczny koło Laguny Shila jest wygładzony pod wpływem lodu. Lawy spływały głównie w stronę Laguny de Chachas w Dolinie Wulkanów tworząc pokrywę o powierzchni ponad 40 km². Na lawach wykształciły się już gleby i dolna

część ich pokrywy jest zagospodarowana rolniczo przez mieszkańców wioski Chachas. Czoło potoku lawy znajduje się obecnie pod wodą i osadami laguny na wysokości 2900 m. W połowie tej drogi spływu powstał stosunkowo duży stożek piroklastyczny (około 250 m) Puca-mauras. Wulkan jest wyraźnie młodszą formą w tym rejonie.

Rio Mollocco

Jest to stosunkowo mały obszar występowania grupy Andahua, ale interesujący ze względu na różnorodność form. Produkty wulkanizmu zaliczono do II generacji mimo objawów erozji glacialnej. Formy morfologiczne są dobrze zachowane. Główne pole lawowe wypełnia dno Doliny Mollocco (Fig. 8). Zlokalizowano tam dwie małe kopuły lawowe, z których lawa spływała w kierunku Kanionu Colca. Powyżej tych kopuł znajduje się stożek piroklastyczny Marhuas o względnej wysokości 120 m. Opływa go od wschodu potok lawy z wyraźnymi wałami brzegowymi. Inny potok lawy spływa z małej dolinki glacialnej gdzie zlokalizowano dwa małe kratery lawowe.

Podobna dolinka znajduje się po zachodniej stronie Doliny Mollocco i jest także częściowo wypełniona lawami Andahua. W górnej części tej dolinki znajduje się kopalnia złota Paula. Do erupcji doszło w dnie tej dolinki (poniżej kopalni), a lawy spływały w stronę Doliny Mollocco. Znajduje się tu największa spośród obserwowanych kopuł grupy Andahua – Cerro Coropuna o wysokości względnej 250 m. Kopuła jest niezwykle stroma (Fig. 9) i w całości zbudowana z lawy masywnej. Możliwe, że była to kopuła ekstruzywna typu Pelee. Jej szczyt znajduje się na wysokości 5180 m n.p.m.



Fig. 9. Kopuła lawowa Cerro Coropuna (5180 m n.p.m.). W tle stratowulkany Sabancaya i Ampato

Fig. 9. Cerro Coropuna (5180 m a.s.l.) lava dome. At the horizon Sabancaya and Ampato strato-volcanoes

Mniejsze kopuły lawowe znajdują się 1–3 km na wschód. Wypływają z nich potoki lawy blokowo-żuźlowej. Pokrywa lawowa w tej dolinie ma grubość nieco ponad 10 m, a długość poszczególnych potoków 1–3 km. Koluwia zawierają niewiele materiału z grupy Andahua.

Caylloma

Jest to obszar wyżyny górskiej, wewnątrz plioceńskiej kaldery zlokalizowanej na południe od Caylloma (Fig. 1). Znajdują się tu samotne stożki piroklastyczno-lawowe skał typowych dla grupy Andahua. Noszą nazwy: Antaymarca, Saigua, Challpo, Andallullo, Antacollo i Sani. Mimo surowego klimatu na wysokości około 4500 m n.p.m. stożki są częściowo porośnięte roślinnością i należy je uznać za I lub, co najwyżej, II generację wiekową. Dokładnie zbadany został wulkan Antaymarca, którego nazwa pochodzi od obronnego muru, który został wzniesiony wokół szczytu. Wulkan ma wysokość 140 m i dość płaski wierzchołek o średnicy 100 m. Krater nie zaznacza się. Na wierzchołku obserwowano mocno porowatą lawę, pumeks, skorię i bomby wulkaniczne oraz nieco law trzewiowych (Fig. 10).

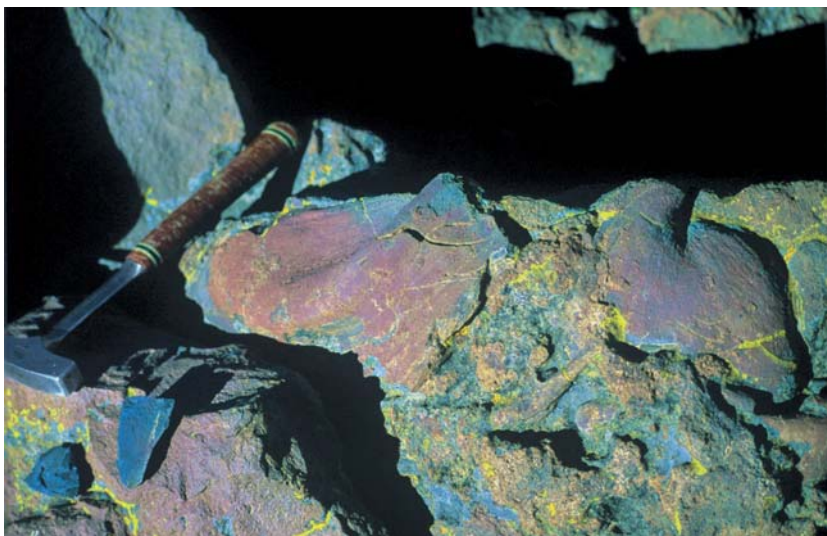


Fig. 10. Lawa trzewiowa z krateru wulkanu Antaymarca

Fig. 10. Intestine lava from Antaymarca volcano

Gloriahuasi

Jest to obszar położony po południowej stronie Kanionu Colca (Fig. 11), niemal niezamieszkały ze względu na nieliczne źródła wody. Lawy należą do najstarszej generacji (I).

Ze względu na wysoki stopień erozji za najstarsze uznano trzy pola lawy w sąsiedztwie Gloriahuasi. Na polu Luceria istnieją dwa stożki piroklastyczne Honda i San Cristobal, które prawdopodobnie wyrosły w końcowej fazie erupcji na kopułach lawowych. Lawy spływają do Kanionu Colca. Pole drugie – Gloriahuasi – tworzy w górnej części dość zwartą pokrywę, z której w kierunku kanionu spływały szerokie potoki lawy.

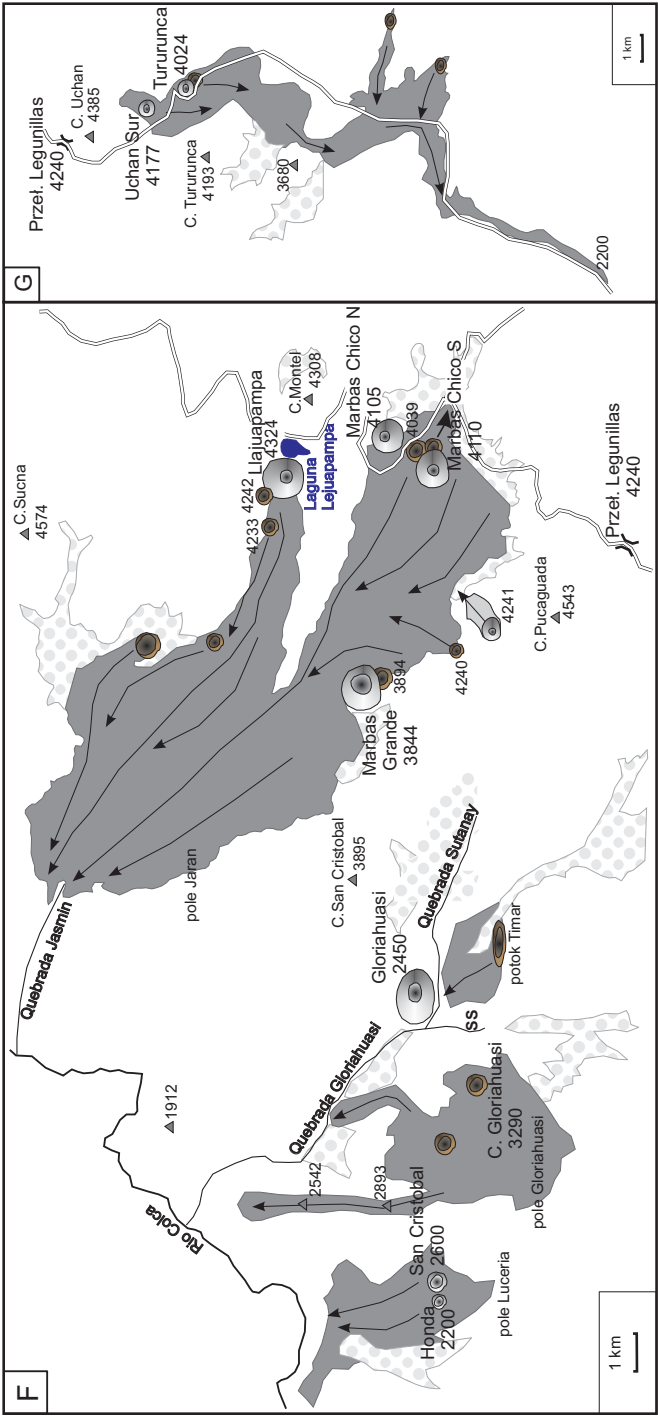


Fig. 11. Zasięg grupy Andahua w rejonie Przełęczy Legunillas (F i G). Objaśnienia jak do figury 2
Fig. 11. Andahua Group at the region Legunillas Pass (F and G). Explanations – see figure 2

Obecnie widoczne są tylko fragmenty tych potoków w postaci wąskich listew na grzbietach rozoranych wąwozami nad kanionem. Pole to było zasilane przez kilka centrów erupcyjnych, z których dwa są dobrze zachowane.

Potok Timar wydobywał się z jednego centrum, prawdopodobnie długiej na ponad kilometr szczeliny. Pole urywa się tworząc urwisko nad skrzyżowaniem Dolin Sutanay i Gloriahuasi. Ma ono wysokość około 400 m. Naprzeciw tej struktury znajduje się duży wulkan Gloriahuasi o wysokości względnej 450 m (Fig. 12). Jest to jedyny stratowulkan należący do grupy Andahua.



Fig. 12. Stratowulkan Gloriahuasi

Fig. 12. Gloriahuasi stratovolcano

U źródeł potoku Gloriahuasi, w stromym wąwozie, skały pokryte są nalotami siarki rodzimej – prawdopodobnie efekt procesów postwulkanicznych.

Największe w tym rejonie jest pole Jarán o powierzchni około 75 km². Wyróżniono w nim 13 centrów erupcyjnych (Fig. 11). Lawy wypływały w górnej części doliny Rio Jarán (dziś suchej) oraz na jej brzegach i rozwidleniach, a następnie połączyły się w jedno pole. W ten sposób całe dno doliny na długości 19 km wypełniła pokrywa law o szerokości dochodzącej do 6 km. Dolina Jarán jest zawieszona nad Kanionem Colca. Po ustaniu erupcji rzeka rozcięła lawy wąwozami odkładając na ich brzegach tarasy żwirowe. Obecnie woda pojawia się okresowo.

Po zakończeniu emisji law niektóre centra wyrzucały jeszcze materiał piroklastyczny, z którego usypywane były stożki. Najwyższy z nich to wulkan Llajuapampa (4324 m n.p.m.), który ma wysokość względną 170 m. Zatamował on spływ wód spod Cerro Montel tworząc małe jezioro. Wulkany Marbas Chico Sur i Norte oraz Marbas Grande są niewiele niższe. Stożek Marbas Chico Norte ma wysokość 139 m i nachylenie stoku 35°. Na stoku Cerro Pucaguada, 400 m powyżej dna doliny, znajduje się jeszcze jeden stożek, który wydaje się być

nieco młodszy (II generacja). Początkowo z tego centrum wypłynęła lava, która spłynęła w dół po stoku na aluwia. Drugie centrum położone na tym samym stoku około 1 km na NW emitowało lawę, która połączyła się z głównym polem lawowym w dnie doliny.

Najbardziej na południe znajduje się pole Uchan, przez które prowadzi droga z Huambo do Pedregal i dalej do Arequipy (Fig. 11). Lawy z tego pola spływają długim na 10 km i wąskim potokiem na SW. Zlokalizowano tu dwa stożki piroklastyczne: Uchan Sur (4177 m n.p.m.) i Tururunca (4024 m n.p.m.). Emisje law w środkowej części następowały ze szczelin.

Rejon Huambo–Cabanaconde

Większość centrów erupcyjnych znajduje się na rozległym płaskowyżu (3400–4300 m n.p.m.), którego brzeg tworzy południową krawędź Kanionu Colca. Najstarsze erupcje miały miejsce na NE od wioski Chinini. Lawy wypływały z kilku kopuł, z których największa ma obecnie wysokość względną ponad 100 m. Duża część law spływała kaskadą do doliny, gdzie leży Chinini, a pozostała część rozlewała się po płaskowyżu pampy. Kolejne erupcje miały miejsce bardziej na północ, na uskokuach równoległych do przebiegu Kanionu Colca (SW-NE)(Fig. 13). Prawdopodobnie były to wypływy szczelinowe, a aktywność uskoku trwała jeszcze po zakończeniu erupcji. Linia kopuł jest wyraźnie podniesiona od strony kanionu (Fig. 14). Nieco młodsze są lawy, których centra erupcji są położone w SE części tego pola lawowego. Krawędzie tych potoków i miejsca erupcji są lepiej zachowane. Można wskazać, co najmniej trzy kopuły, z których potoki wypływały na zachód oraz na północ łącząc się ze starszymi lawami. Te ostatnie potoki dotarły aż do kanionu, spływając stromą kaskadą na jego dno. Najdłuższy potok ma 14 km. Także te potoki przecięte są wspomnianymi uskokami. Najmłodszą formą wulkaniczną na tym polu lawy jest wulkan Mojonpampa, który usytuowany jest na dawnej kopule lawowej. Pokrywa law ma powierzchnię około 100 km².



Fig. 13. Kopuły lawowe najstarszej generacji przecięte uskokiem równoległym do przebiegu Kanionu Colca

Fig. 13. Lava domes cut through by fault parallel to Canyon Colca

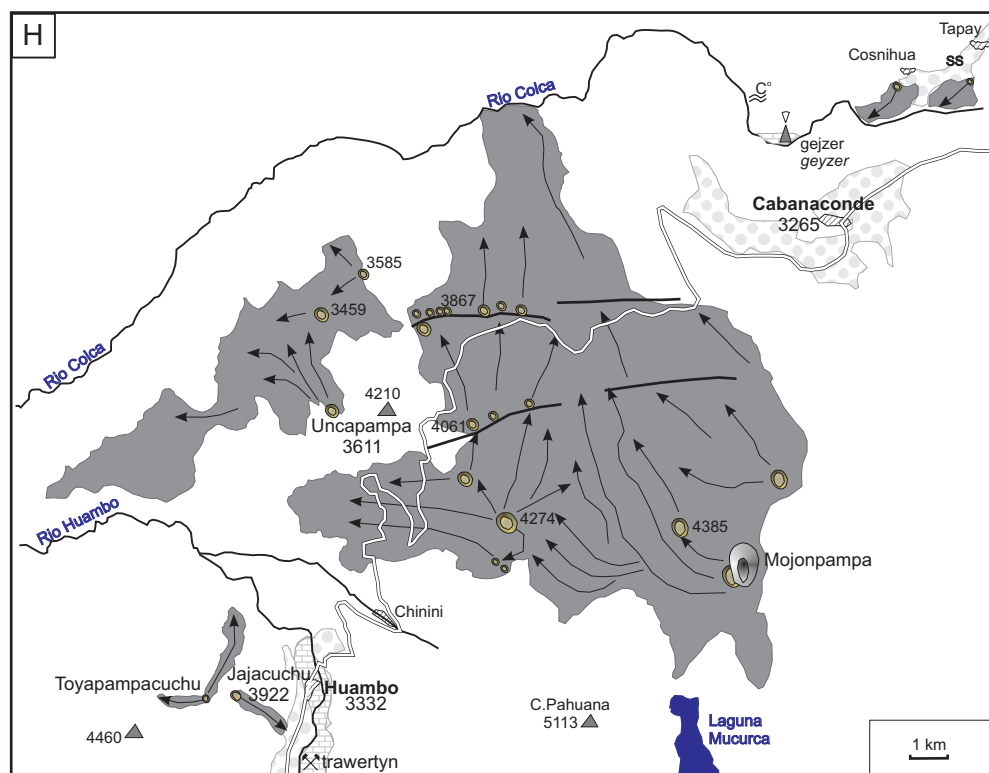


Fig. 14. Zasięg grupy Andahua w rejonie Huambo – Cabanaconde (H). Objasnienia jak do figury 2

Fig. 14. Andahua group at the region Huambo – Cabanaconde (H). Explanations – see figure 2

Drugie pole lawowe oddzielone jest od wcześniej opisanego wysokim, na około 600 m, grzbietem, (4210 m n.p.m.) (Fig. 14) zbudowanym ze sfałdowanych kwarcytów (grupa Yura, jura/kreda), które przykrywa intruzja dacytu. Kopuły dacytowe zaliczane obecnie do grupy Andahua (Caldas *et al.* 2002) w rzeczywistości należą do starszej formacji. Pole jest wiekowo zbliżone do najstarszych erupcji. Centra erupcji są znacznie zniszczone erozją, a przebieg potoków jest tylko miejscami możliwy do odczytania. Powierzchnia law tworzy jakby stół nad kanionem. Brzegi tego pola lawowego są erozyjne. Wyróżniono tu trzy centra erupcyjne. U podnóża grzbietu znajduje się krater lawowy – Uncapampa (3611 m n.p.m.), w centrum pola jest natomiast zerodowana kopuła (3459 m n.p.m.). Mała kopuła (3585 m n.p.m.) znajduje się na samym grzbiecie w jego części schodzącej w stronę kanionu. Z tej kopuły lawy wypływały na obie strony grzbietu.

Pozostałe erupcje w tym rejonie miały znacznie mniejszy zasięg. Dwa kratery lawowe zlokalizowane są na grzbietach (Toyapampacuchu i Jajacuchu) nad Huambo. Potoki lawy spłynęły na obie strony grzbietów, a najdłuższy (4 km) dotarł na dno Doliny Huambo. Część Doliny Huambo na wysokości od 3400 do 3700 m n.p.m. wypełniona jest grubą pokrywą trawertynu, związaną z działalnością wulkaniczną.

Ślady dwóch niewielkich wypływów lawy można obserwować także w samym kanionie poniżej Tapay i pomiędzy Tapay a wioską Cosnihua (Fig. 14). Na ścianach wąwozu schodzącego do Rio Colca, poniżej law, skały są pokryte nalotami siarki rodzimej. A w samym Kanionie Colca, nieco na zachód, znajduje się wygasły gejzer i zbocza zbudowane z trawertynu.

Chivay

Jest to obszar oddalony około 50 km od Cabanaconde i stosunkowo mały (Fig. 15). Lawy prawdopodobnie pochodzą z dwóch okresów – starszego I i średniego II. Starsze zajmują dno i północny brzeg Doliny Rio Colca koło Chivay. Rio Colca wypręparowała w nich głęboki na kilkadziesiąt metrów kanion. Około 3 km na północ od Chivay pojawia się pole lawowe młodszych law. Rzeka opływa je od wschodu. Pole było zasilane przez co najmniej 11 kopuł lawowych, z których największe znajdują się w jego górnej części. Lawy spływały w stronę Chivay.

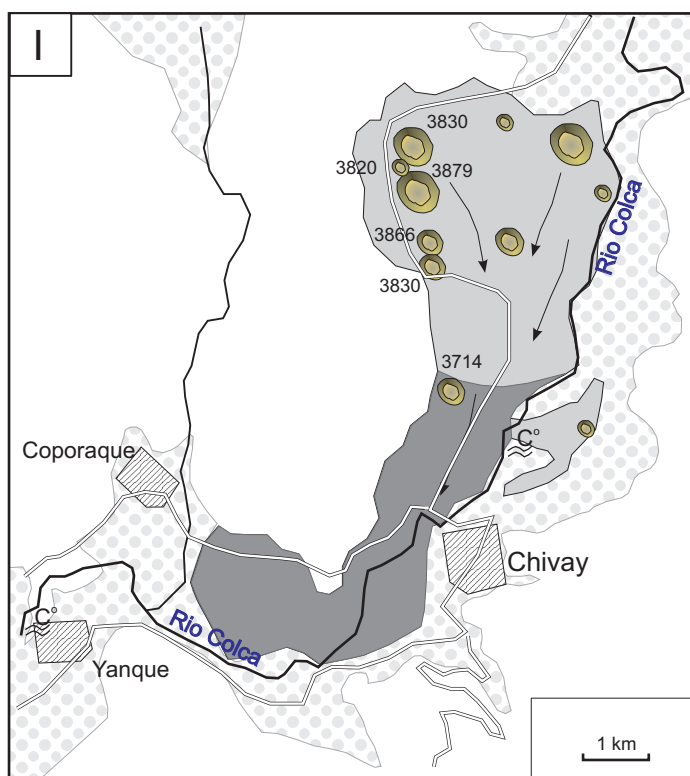


Fig. 15. Zasięg grupy Andahua w rejonie Chivay (I). Objasnienia jak do figury 2

Fig. 15. Andahua group at the region Chivay (I). Explanations – see figure 2

Możliwe, że holoceniński potok lawowy Queñua Ranra (Weibel & Fejér 1977) wypływający spod czapy lodowej wschodniego wierzchołka stratowulkanu Coropuna (tj. z wysokości co najmniej 5500 m n.p.m.) należy również do grupy Andahua.

ZWIĄZKI AKTYWNOŚCI WULKANICZNEJ Z TEKTONIKĄ

Zdaniem Caldas (1993) pokrywy lawowe i stożki piroklastyczne Andahua grupują się wzdłuż niecek tektonicznych i wąwozów, które mają założenie tektoniczne i wynikają z regionalnej tensji wzdłuż uskoku i wcześniejszych szczelin kompresyjnych. Głębokie pęknięcie skorupy sięgało jego zdaniem aż do komór magmowych, powodując spadek ciśnienia i podnoszenie się magmy.

Powyższy pogląd trzeba przyjąć z zastrzeżeniem. Centra erupcji nie są bowiem ograniczone do Doliny Wulkanów lecz występują również na zrębach, np. Antapuna nad Orcopampa (Fig. 7), centra koło kopalni Shila, Paula i Ares (wszystkie powyżej 4800 m n.p.m.) (Fig. 8). Pola law w środkowej części tej doliny wydają się wypełniać pasywnie depresję, a zidentyfikowane centra erupcji lub szczeliny wiążą się z uskokami poprzecznymi do doliny. Taka sytuacja ma miejsce wzdłuż linii wulkan Jenchaña – kopuła Ninamama oraz grupa kopuł zamykających dolinę Sucna (Fig. 3).

Tektonika w tej części Andów wskazuje na następujący układ sił w kenozoiku: rozciąganie N-S i kompresja sub-równoleżnikowa, która zanika od końca plejstocenu (Mering *et al.* 1996).

Wyróżnić można następujące trzy systemy uskoku:

- 1) grawitacyjny, stromy o kierunku 330–360°, który ogranicza dolinę Andahua w okolicy Poracota, Orcopampa i Ayo, a jednocześnie przecina starsze potoki law Andahua (Fig. 11);
- 2) przesuwowy, lewoskrętny, około 300°, powodujący wzajemne przesunięcie północnej i południowej części tej doliny;
- 3) grawitacyjny, pochylony ku SE, o biegu 50–90°, który zaznacza się w terenie rozwojem wąwozów.

Systemy 2 i 3 wydają się aktywne, lecz niewykluczone, że rola 2 systemu ogranicza się do osłabienia górotworu i rozwoju rzeźby dolinnej (Gałaś & Paulo 2005).

Ustalenie związku centrów erupcji grupy Andahua z tektoniką lokalną wymaga dalszych badań.

CHARAKTERYSTYKA PETROGRAFICZNO-LITOLOGICZNA WULKANITÓW ANDAHUA

Lawy Andahua są czarne lub ciemnoszare, a w strefie poniżej 3000 m n.p.m. na zwietrzałej powierzchni czerwone. Tefra stożków wulkanicznych jest w przewadze czarna, a tylko w pobliżu kraterów aglomerat bomb spojony lawą i scoria są czerwone. Popioły są czarne, nieraz z białymi warstewkami minerałów ilastych. Wszystkie te produkty cechuje znaczna porowatość 10–40%, sięgająca w stożkach ponad 70%. Lawy blokowe wyciśnięte z kopuły są wyraźnie mniej porowate, niekiedy megaskopowo masywne w pobliżu miejsc erupcji. W miarę oddalania się od nich wzrasta porowatość i powierzchnia przyjmuje formę żuźłowatych bloków lawy typu aa. Na wierzchołku wulkanu Antaymarca zaobserwowano lawę trzewiową. Oczywiście na starszych potokach żuźłowata skorupa jest już usunięta przez erozję, albo trudno dostrzegalna na skutek wypełnienia przez produkty wietrzenia oraz pokrycia przez inicjalne gleby i rośliny. W kanionach rzek Andahua, Chilcaymarca i Colca, a także w grzbietowych częściach Kordyliery Zachodniej, które do niedawna były zlodowaczone, odsłonięte są lawy masywne z wnętrza potoków.

Wśród wulkanitów Andahua przeważają skały afanitowe i porfirowe o małej zawartości fenokryształów, do 20%. Są to głównie fenoandezyty, czyli skały zawierające plagioklaz i pirokseny, a podrzędnie oliwin i/lub hornblendę i tytanomagnetyt. W kilku miejscach występują bazalty oliwinowe i fenodacyty, czyli skały o przewadze hornblendy wśród minerałów ciemnych, niekiedy występującej w towarzystwie biotyty. Analizy chemiczne (Hoempler 1962, Weibel & Fejér 1977, Venturelli *et al.* 1978, Delacour 2002) potwierdziły dość szeroką gamę składu: 51.8–67.9% SiO₂, przy czym większość próbek mieści się w przedziale 55–61% SiO₂ oraz 2–3% K₂O. Są to zatem wysokopotasowe andezyty (latyandezyty) i andezyty bazaltowe.

W pobliżu Andahua lawy zawierają liczne ksenolity białych kwarcytów dolnej kredy (Caldas 1994). Kwarcyty te budują wysokie zbocza doliny, a zapewne występują na dnie rowu wypełnionego lawami.

Badania fenokryształów mikrosondą elektronową (Delacour 2002) wykazały obecność zonalnych plagioklazów An₆₃₋₇₂ w bazaltach i An₂₉₋₄₉ w dacytach, a członów pośrednich labrador-andezyn w andezytach. W fenokryształach plagioklazów obserwowano strefy bogate w inkluzje szkliska. Plagioklasy są również dominującymi składnikami mikrolitów i mikrokryształów, a ich skład jest tylko nieznacznie bardziej kwaśny od składu fenokryształów. Na podstawie tych obserwacji wnioskowano o przederupcyjnym stanie magmy bliskim likwidu i dość dużym udziale H₂O, rzędu 2–5%. Wśród piroksenów przeważa augit; w niektórych andezytach obecny jest też enstatyt tworzący otoczki na oliwinie. Oliwiny reprezentowane są przez człon magnezowy ze znaczną domieszką Cr i Ni. Amfibole badane przez Delacour (2002) miały skład Mg-hastingsytu i tschermakitu, były otoczone koronami ilmenitu i tytanomagnetytu.

Skały wulkaniczne niosą swoisty zapis procesów zachodzących w kilku miejscach: miejscu ich narodzenia w głębi Ziemi, w komorze wulkanicznej, gdzie magma dojrzewała oraz na powierzchni, gdzie płynęła i stygła. Z badań Delacour *et al.* (2002) wynika, że komory magmowe wulkanów Andahua są oddzielne od komór wielkich stratowulkanów i znajdują się prawdopodobnie na głębokości 10–40 km. Ich dokładniejsza lokalizacja wymaga jednak badań sejsmologicznych.

PROGNOZA ZAGROŻEŃ ERUPCJAMI

Erupeje wulkaniczne mają tak różną energię i tak różnorodny styl, że są trudno porównywalne. Rozmiary erupcji i zagrożenie życia są kwalifikowane przy użyciu wskaźnika eksplozywności, VEI (Newhall & Self 1982, Simkin & Siebert 1994). Dziewięciostopniowa skala VEI (*Volcanic Explosivity Index*) jest proporcjonalna do rzędu (n) objętości wyrzuconej tefry, mierzonej w km³:

$$\text{Stopień VEI} = (0.00001 \div 0.0001) \cdot 10^n \text{ km}^3$$

Każdy wulkan ma swoisty sposób działania, który często jest bardzo złożony, komplikuje go cykliczność wylewów i wybuchów. Rozszyfrowanie historii dotychczasowej aktywności i stylu erupcji pozwala jednak na prognozowanie charakteru przyszłych wybuchów. Przebieg erupcji wulkanicznej można odczytać z ułożenia produktów wybuchu, zwłaszcza w warstwach piroklastycznych.

Podczas wybuchów piroklastycznych koło Andahua rozżarzone bomby i fragmenty lawy były wyrzeliwane z krateru; opadały na powierzchnię stożka, a sporadycznie wokół niego

w promieniu 100–1500 m. Takie fajerwerki trwają we współcześnie czynnych wulkanach zwykle kilka dni. Jeśli zachodziły w Dolinie Andahua, nie były zauważone w innych częściach Andów. Odpowiadałoby to stopniom 1–2 (a wyjątkowo 3) VEI. Obserwacja powierzchni potoków zakrzepłej lawy wskazuje, że spływały one powoli (stopień 0 VEI) (Gałaś & Paulo 2005).

Kilka miasteczek i wsi – Orcopampa, Andahua, Soporo, Chachas, Misahuanca, Huambo – leży tuż pod stożkami i kopułami wulkanicznymi. Wulkany te wydają się bezpowrotnie wygasłe, choć bywają określane jako drzemiące (Fidel *et al.* 1997). Najmłodsze centra erupcji znajdują się w odległości kilku kilometrów od najbliższych osiedli, a układ topograficzny uniemożliwiłby spływ lawy w ich kierunku, gdyby doszło do wznowienia działalności z tych miejsc. Jednakże migracja miejsc erupcji, charakterystyczna dla grupy Andahua sprawia, że należy oczekiwać wznowienia erupcji w nowych miejscach. Będą one prawdopodobnie ułożone wzdłuż uskoków o kierunku NEE i NWW, tj. poprzecznych i podłużnych względem środkowego segmentu Doliny Wulkanów.

Choć niebezpieczeństwo nowych erupcji jest niewielkie to grupa Andahua zasługuje na uwagę wulkanologów. Ze względu na dużą ilość centrów wulkanicznych zlokalizowanych na małym terenie jest mikropoligonem badawczym. Jest prawdopodobnie najmłodszą formacją wulkaniczną w Andach, która pozostaje niezbadana. Jednocześnie ma niezwykle walory krajobrazowe i edukacyjne. Ochrona jej najciekawszych form w Dolinie Wulkanów w granicach przyszłego parku narodowego jest w pełni uzasadniona.

Autor wyraża specjalne podziękowanie prof. Andrzejowi Paulo za zaproszenie do wzięcia udziału w wyprawie rekonesansowej w 2003 roku i pomoc merytoryczną w realizacji projektu badań nad grupą Andahua.

Praca została wykonana w ramach badań własnych AGH, nr 10.10.140.449

LITERATURA

- Cabrera M. & Thouret J.-C., 2000. Volcanismo monogenético en el sur del Perú. *X Congr. Peruano de Geología, Sociedad Geológica del Perú*, Lima Res., 186.
- Caldas J., 1993. *Geología de los cuadrangulos de Huambo y Orcopampa*. INGEMMET Bul. 46. Lima.
- Caldas J., Fernandez D.R. & Turpo P.T., 2002. *Mapa geológico del cudrángulo de Huambo (actualizado) 1 : 50 000*. INGEMMET.
- Caldas J., La Torre V., Lajo A., Díaz J. & Umpire L., 2001. *Mapa geológico del cudrángulo de Orcopampa (actualizado) 1 : 100 000 (digital)*. INGEMMET.
- Delacour A., 2002. Etude pétrogénétique des laves des centres quaternaires mineurs dans les régions d'Andahua-Orcopampa, de Huambo et du Cerro Nicholson (Andes Centrales, Perou). DEA "Processus magmatiques et métamorphiques – Volcanologie" & Université Blaise-Pascal, Clermont Ferrand, 48.
- Delacour A., Paquereau P., Gerbe M.-C., Thouret J.-C. & Wörner G., 2002. Quaternary minor volcanic centres in southern Peru: volcanology, petrology and geochemistry. 5th ISAG: 175–179. Toulouse.

- Fidel S.L., Morche W. & Nuñez J.S., 1997. Inventario de volcanes del Peru. INGEMMET Bul. 15. Lima.
- Gałaś A. & Paulo A., 2005. Karłowate wulkany formacji Andahua w południowym Peru. *Przegląd Geologiczny*, 53, 4, 320–326.
- Grodzicki J., 1994. Nasca: Los síntomas geológicos del fenómeno El Nino y sus aspectos arqueológicos. *CESLA, Studia i Materiały*, 12, 1–114.
- Hoempler A., 1962. Valle de volcanes de Andahua, Arequipa. Segundo Congr. Nac. de Geología. *Sociedad Geológica del Perú*, 37, 59–69. Lima
- Kaneoka I. & Guevara C., 1984. K-Ar determinations of late Tertiary and Quaternary Andean volcanic rocks, Southern Peru. *Geochemical Journal*, 18, 233–239.
- Marcoux E., Cassard D., Faure M., Llosa F., André A.-S. & Leroy J., 1998. Formación y evolución de las vetas epitermales Au-Ag en la Cordillera Shila, al sur del Perú. *Third international Gold Symposium*, May 5–8, Lima, Conferences Vol., 392–399.
- Mayta O., Barrionuevo H., Noble D., Petersen U. & Vidal C., 2002. Vetass de oro nativo y telururos de oro en el sector Chipmo, distrito minero de Orcopampa, sur del Perú. XI Congr. Peruano de Geología, *Sociedad Geológica del Perú*, Lima.
- Mering C. *et al.*, 1996. New data on the geodynamics of southern Peru from computerized analysis of SPOT and SAR ERS-1 images. *Tectonophysics*, 259, 153–169.
- Moncayo O.P., 1994. *Geología de los cuadrangulos de Chulca y Cayareni*. Carta Geológica Nacional. Serie A, Boletín No. 51. Instituto Geologico Minero y Metalurgico. Lima.
- Moscol M., 2001. La vegetación del Holoceno y los cambios climáticos en Arequipa, Cordillera Occidental, Perú. Proyecto Arqueol. *Condesuyos, Universidad de Varsovia, 1, Andes*, 3, 241–245.
- Portocarrero A., 1960. Reconocimiento geológico del Valle de Andahua. Tesis de maestro. UNSA Arequipa.
- Sheppee R., 1934. A forgotten Valley of Peru. *The National Geographic Magazine*. Washington DC, 110–132.
- Simkin T. & Siebert L., 1994. *Volcanoes of the World – A regional directory, gazetter and chronology of volcanism during the last 10 000 years*. 2nd ed. Smithsonian Inst. Geosciences Press Inc., Washington DC, 1–349.
- Smoll L.F., Morche W. & Juárez S.N., 1997. Inventario de Volcanes del Peru. Geodinámica e Ingeniería Geológica. Serie C, Boletín No. 15. *Instituto Geologico Minero y Metalurgico*. Lima, 1–14.
- Thouret J.-C., Juvigne E., Mariño J., Moscol M., Legeley-Padovani A., Loutsch I., Dávila J., Lamadon S. & Rivera M., 2001b. Late Pleistocene and Holocene tephro-stratigraphy and chronology in southern Peru. Proyecto Arqueol. *Condesuyos, Universidad Varsovia, Andes*, 3, 215–239.
- Venturelli G., Frangipane M., Weibel M. & Antiga D., 1978. Trace element distribution in the Cainozoic lavas of Nevado Coropuna and Andagua Valley, Central Andes of Southern Peru. *Bulletin of Volcanology*, 41, 3, 213–228.
- Weibel M. & Fejér Z., 1977. El Nevado Coropuna, Departamento de Arequipa. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, 57–58, 87–98.

Summary

In 2003, 2004 and 2006 a small group of geologists from AGH University of Science and Technology conducted field research in both of the sides in the deepest canyon in the world – the Rio Colca Canyon in the south of Peru. The subject of the research was the Quaternary volcano group Andahua, which was first mentioned in 1934 by two pilots Sheppe and Johnson (National Geographic). Until now the origin of Andahua and its range have not been specified.

Andahua vulcanites stretch out at intervals in the area which is 120 km long and 100 km wide. 9 places where one can see the centers of eruption have been distinguished (Fig. 1). Most of them are located in the Valley of Volcanoes. There are 37 lava fields made from one or more lava streams, 46 piroclastic cones and 116 centers of lava eruption, including the domes and cracks.

While compiling the map of the above-mentioned group, applied a simple division into 3 age groups: the old one (the Pleistocene), the indirect group (the Pleistocene – the Holocene) and the youngest one (the Holocene). The old group is weathered, carved by the eruption, covered with flora, and it is often transformed into fields. The blocks of lava are smooth and the boundaries of the former lava streams – faint and irregular. They interwine with the river deposits and in the alpine region they are marked by the glacial erosion. The lava of the indirect group was the reason of the formation of the initial soil, grown by the grass, cacti or various kind of bushes. The surface of the lava from the Holocene is rough and sharp. It is possible to notice the places where the lava flowed out. Apart from that, the slopes of the lava streams are steep, not very stable, and the structures of the flow clear and distinct. There are no plants, they did not manage to root. The youngest lava eruption took place about 300–400 years ago.

Among the Andahua vulcanites the main group are afanit and porphyry rocks, which are characterized by the small content of phenocrystals, up to 20%. These are mainly fenoandesites, the rocks which have plagioclase and pyroxenes, and sometimes olivine and/or hornblende and titaniummagnetite. In several places one can find olivine basalts and fenodacite, which, among the dark minerals, are the rocks with a lot of hornblende (sometimes accompanied by biotite).

The greatest area of the Andahua group, where at the same time the volcanism products are the most common, is the Valley of Volcanoes (Figs 2, 3). This valley, between the Misahu-anca and Ayo, is covered by a dense cover of lava, which is about 60 km long. The south part of the Valley of Volcanoes (all the way to the Colca Canyon) is coated with the youngest (Figs 4, 5), third generation lava which creates lava field called Chilcayoc. A considerable zone of the eruption centers is placed about 2 km south-east of that place, near the mouth of the side valley, where a village called Soporo can be found. The oldest of the eruption zone seems to be the Jechapita volcano, which is a great example of the piroclastic cone. The distinct structures of the flow of two small streams indicate that the volcano is situated in the place, where lava use to have its source. Two similar cones situated upper in the valley – Chilcayoc and Chico and the third one – Chilcayoc Grande (3 km down the valley) are torn by the lava streams, which later surrounded Jechapita (Fig. 6). Most of the lava flowed down into the Rio Colca Canyon and it created the streams, which were more than 20 km long. Lava was much more

sticky, cinder and it made the ridges, which looked like the glacier moraines. The width of the stream rarely exceeded 1 km. The streams flowed down the rock steps of two faults running crosswise to the valley, creating unusual cascades with characteristic levees. Those lava streams below Ayo are torn with young, longitudinal faults extending up to Colca Canyon.

The Valley of Volcanoes has an axis orientated NW-SE (Fig. 2). Rio Sora Valley is the side branch of the Valley of Volcanoes and it has the same direction of the axis. Rio Sora Valley merges with the main valley in the place, where the Valley of Volcanoes turns taking the meridian orientation. The major lava eruption took place in the upper part of the valley. The streams flooded wide on the pampas and then they flowed down toward the outlet of the Valley of Volcanoes. At the Pabellon Lagoon level the lava field spreads out into the whole width of the valley (6 km). Here are other eruption centers: Jochane dome and two cones – Pabellon and Yana Mauras.

The Valley of Volcanoes is closed in the north by the Antapuna area. Antapuna Massif is the dominant form there, which looking to the north, gradually changes into Altiplano (Fig. 7). Andahua vulcanites in this region form isolated islands, the biggest of which is Antapuna. This is only the first generation lava. The greatest eruption center – Antapuna is situated about 1000 meters above the bottom of the Valley of Volcanoes. Because of the intense glacial erosion all of the forms in this area are partly damaged and not distinct.

The lava of Andahua group appears also near two gold mines: Shila and Paula (Fig. 8). Cerro Coropuna (Fig. 9), the highest lava dome of this group, is placed next to Paula mine and it is 400 m high. Going further to the east of the Altiplano, near the Huarthuarco Lagoon, 6 volcanoes can be seen. They are not rooted in the lava and inside one of them intestine lava was found (Fig. 10).

On the other side of the Colca Canyon most of the lava streams flowed into the canyon (Figs 11–15). Lava which can be observed here is the oldest one. The shores of the streams are often damaged by the river erosion. In this place one can identify two big lava fields: Jaran and Mojonpampa. They can be characterized by a significant number of eruption centers (13 and 19 respectively). The lava cover of the Mojonpampa field is the area of about 100 km². Similarly as in the case of above-mentioned eruption, also here the latest forms of volcanic activity created piroclastic cones. In the valley of a periodic stream Glorihuasi the only stratovolcano, which belonged to this group was discovered. Its height was 450 m (Fig. 12).

In the time of piroclastic's eruption near Andahua, the glowing-hot bombs and pieces of lava were shot from the crater; they fell on the surface of the cone and occasionally near it within 100–1500 m radius. Much further, in the area of dispersion which existed only in the case of some cones, layers of volcanic ash can nowadays be observed. They are up to few meters thick. Such fireworks usually last for few days. If they happened in Andahua Valley, they were not seen in the other parts of the Andes. That would correspond with 1–2 VEI degrees (exceptionally 3). The observation of the surface of the hardened lava shows that they flowed slowly (0 VEI degree).