

Evolution différenciée de la ferrallitisation dans un profil complexe d'altération de roches volcaniques acides et basiques superposées, à Tenerife Iles Canaries

M.L. TEJEDOR SALGUERO, L. GARCÍA, C. JIMÉNEZ, E. FERNÁNDEZ CALDAS

Département d'Edaphologie. Université de La Laguna Ténérife (Espagne)

RÉSUMÉ

Les auteurs ont étudié les caractères morphologiques, physico-chimiques et micromorphologiques d'un profil complexe, situé dans l'Archipel des Canaries, sous un régime climatique humide (Udique). Le profil est formé de la superposition de sols développés à partir de matériaux volcaniques de nature et d'âge variés (près de 5 millions d'années pour le plus ancien, environ 9.000 ans pour le plus récent).

Le sol superficiel et le sol le plus profond se sont formés sur des matériaux basaltiques, cendres pour le premier et coulée pour le second, tandis que les sols intermédiaires se développent essentiellement à partir de matériaux pyroclastiques acides. Le sol superficiel a des caractères andiques et le sol le plus profond correspond à une altération de type ferrallitique (AUBERT, SEGALEN, 1966 ; CHATELIN, 1972, 1974).

Les faits recueillis permettent l'établissement d'hypothèses sur l'évolution de matériaux basiques et acides sous un régime hydrique Udique dans l'Archipel des Canaries. Les sols sur matériaux basiques (cendres basaltiques et coulées) sont éminemment ferritiques, avec accumulation de fer et de titane, tandis que les sols sur matériaux saliques suivent une évolution allitique, avec dominance des hydroxides d'aluminium (gibbsite) et faible individualisation des composés ferrugineux.

En certains horizons des sols formés sur matériaux saliques, on observe en plus de petites quantités d'illite et de vermiculite, que les auteurs attribuent à l'évolution des micas présents dans le matériau acide.

MOTS-CLÉS : Matériau volcanique — Matériau volcanique basique — Altération ferrallitique — Altération allitique.

RESUMEN

EVOLUCIÓN DIFERENCIADA DE LA FERRALITIZACIÓN EN UN PERFIL COMPLEJO DE ALTERACIÓN DE ROCAS VOLCÁNICAS ÁCIDAS Y BÁSICAS SUPERPUSTAS EN TENERIFE, ISLAS CANARIAS

Se estudian las características morfológicas, físico-químicas y micromorfológicas de un perfil complejo, situado en régimen climático húmedo (Udic) en el Archipiélago Canario, formado por la superposición de suelos desarrollados a partir de materiales volcánicos de diferente naturaleza y edad (alrededor de 5 millones de años el más reciente).

Dos de los suelos, el superficial y el profundo, se han formado sobre materiales basálticos, ceniza el primero y colada el segundo, mientras que los suelos intermedios se desarrollan fundamentalmente de piroclastos sálicos. El suelo superficial tiene características ándicas y el suelo profundo corresponde a una alteración de tipo ferráltico (AUBERT, SEGALEN, 1966 ; CHATELIN, 1972, 1974).

De los datos obtenidos se emiten hipótesis sobre la evolución de los suelos sobre materiales sálicos y básicos en un régimen hídrico Udic en el Archipiélago Canario. Los suelos sobre materiales básicos tanto sobre coladas como

sobre cenizas basálticas son eminentemente ferríticos, acumulación de hierro y titanio, mientras que los suelos sobre materiales sílicos siguen una evolución alítica, dominando los hidróxidos de aluminio (gibbsite) y siendo mínima la individualización de los compuestos ferruginosos.

En algunos horizontes de los suelos formados sobre materiales sílicos, se observa además pequeñas cantidades de micas presentes en el material ácido.

PALAVRAS CLAVES : Material volcánico ácido — Material volcánico básico — Alteración ferralítica — Alteración alítica.

SUMMARY

DIFFERENTIATED EVOLUTION OF FERRALLITIZATION IN A COMPLEX WEATHERING PROFILE OF SUPERIMPOSED ACID AND BASIC VOLCANIC ROCKS IN TENERIFE, CANARY ISLANDS

The weathering of acid and basic volcanic materials is studied in a ferrallitic complex profile, through morphological, physico-chemical, mineralogical and micromorphological characteristics.

The soil studied is located at an Udic soil moisture regime.

The profile is made up of superimposed volcanic materials, acid and basic alternatively, of different ages, approximately 5 million years for the earliest and 9000 years for the latest.

The most superficial and the deepest soils of this profile, have been formed from basaltic materials, ash and lava respectively. The intermediated soils have been developed from pyroclastic acid materials.

The superficial soil has andic characteristics, and the deepest one shows a ferrallitic weathering.

The data obtained demonstrate that the weathering of the basaltic materials (ashes and consolidated) gives ferritic products (rich in Fe and Ti) while the weathering of acid materials produces allitic components (gibbsite).

In some horizons from acid materials small amounts of illite and vermiculite are also formed, which we attribute to the presence of biotite in the acid materials.

KEY WORDS : Acid volcanic material — Basic volcanic material — Ferrallitic weathering — Allitic weathering.

INTRODUCTION

Le Massif de Anaga correspond à l'une des zones les plus anciennes de l'île de Ténérife, dans l'Archipel des Canaries.

ABDEL-MONEN *et al.* (1972) ont parlé de 15,7 millions d'années pour les basaltes qui constituent le soubassement, alors que différentes datations radiométriques plus récentes (CARRACEDO, 1980) attribuent à ces basaltes un âge d'approximativement 5 millions d'années, âge coïncidant avec le reste du volcanisme fissural de l'île.

Après une période d'inactivité, le Massif de Anaga fut affecté d'éruptions de type plus acide, donnant des trachytes ou phonolites qui ont été datées de 3,4 à 3,6 millions d'années (CARRACEDO, 1980, FERNANDEZ CALDAS *et al.*, 1983). Ces matériaux ont été soumis à des phénomènes érosifs intenses et subsistent seulement dans de petits noyaux.

Bien que l'on ne connaisse pas d'activité volcanique récente dans cette zone, le Massif de Anaga a été contaminé par les éruptions pléistocènes de la partie centrale de l'île. Les datations faites par le C14 sur le charbon trouvé à la base du sol superficiel nous permettent d'attribuer un âge de 8.760 ± 160 années à ce rajouissement récent.

La topographie accusée du Massif de Anaga, résultat de processus érosifs intenses, a favorisé la disparition des sols et l'affleurement des basaltes. Cependant, dans la zone élevée dénommée Monte de Las Mercedes une végétation dense de « Laurisilva » s'est maintenue et a protégé le sol contre l'érosion.

C'est précisément dans cette zone que l'on rencontre des coupes très profondes montrant la superposition de sols formés à partir de matériaux de différentes natures et d'âges variés. L'étude de l'une de ces coupes nous a permis d'émettre des hypothèses sur l'évolution des sols à ce niveau climatique de l'Archipel Canarien.

La pluviométrie annuelle oscille autour de 1.000 mm mais il faut tenir compte de la condensation de l'humidité atmosphérique qui peut être très importante (nébulosité quasi permanente). Certains auteurs vont jusqu'à parler du triple de l'humidité pluviométrique. Les sols du Monte de Las Mercedes présentent un régime hydrique de type « Udique », et un régime thermique de type « Mésique » à la limite du « Thermique ».

LES CARACTÈRES MORPHOLOGIQUES

Il s'agit d'un profil très complexe formé par la

superposition de sols développés à partir de matériaux d'âges et de natures variés.

On observe en premier lieu un sol superficiel de 95 à 120 cm avec des caractères andiques accusés, formé d'un épais horizon organique et d'un horizon B d'altération. A la base de ce dernier horizon, dans un profil voisin, se trouvent des morceaux de charbon qui ont été datés de 8.760 ± 160 ans (QUANTIN, FERNANDEZ CALDAS *et al.*, 1975).

En dessous, approximativement entre 120 et 560 cm apparaissent différents horizons jaunâtres et rougeâtres. Nous avons d'abord pensé à l'existence de niveaux exclusivement phonolitiques ou basaltiques, les couches jaunes étant supposées associées aux matériaux phonolitiques et les couches rouges aux matériaux basaltiques. Cependant, l'étude minéralogique a clairement établi que tout cet ensemble d'horizons est formé à partir d'un même type de matériau acide, avec plus ou moins de contaminations basaltiques.

En dessous, entre 560 cm et la roche fraîche, on trouve une altération ferrallitique typique, développée à partir de matériaux basaltiques consolidés.

Description du profil

Situation : Monte de Las Mercedes (Ile de Ténérife, Espagne).

Altitude : 820 m.

Végétation : dense de Laurisilva. Forêt à feuilles pérennes avec grande variété floristique. Dans l'étage arborescent se remarquent : *Laurus azorica*, *Persea indica*, *Ocotea foetens*, *Apollonias barbujana*.

Conditions climatiques : Zone de condensation des alizés.

Matériau originel : Superposition de matériaux basiques et acides d'âges différents.

A (0/68) Brun très foncé (10 YR 2/2), humide ; texture limono-argileuse ; structure en miettes ; très friable ; pas d'éléments grossiers ; porosité élevée ; racines fines et moyennes abondantes ; thixotropique ; réaction positive, rapide et intense, avec NaF ; limite brusque, plane.

B (68-95/120) Brun rougeâtre foncé (5 YR 3/4), humide ; texture argilo-limoneuse ; structure polyédrique très fine ; peu développée ; très friable ; faible densité ; pas d'éléments grossiers ; racines fines abondantes ; réaction positive, rapide et intense avec NaF ; limite nette.

Morceaux de charbon datés de 8.760 ± 160 ans.

IIB1 (120/270) Brun rougeâtre foncé (5 YR 3/4), humide ; brun foncé (7,5 YR 4/4) sec ; texture argileuse ;

structure polyédro-cubique ; importante porosité ; consistance rigide qui se débite en donnant un aspect pulvérulent ; petits cristaux de feldspaths ; réaction positive au NaF.

IIB2 (270/320) Jaune rougeâtre (5 YR 6-5/8) ; humide ; jaune rougeâtre ou brun intense (7,5 YR 6-5/8) sec ; texture argileuse ; structure polyédrique moyenne, aspect massif à l'état sec ; consistance rigide ; quelques fissures avec matériaux grossiers provenant des horizons supérieurs ; quelques racines ; cristaux de feldspaths un peu plus gros que dans l'horizon supérieur ; réaction positive au NaF.

IIB3 (320/350) Brun rougeâtre (5 YR 4/4) humide ; brun intense (7,5 YR 5/8) sec.

IIB4 (355/385) Brun rougeâtre foncé (5 YR 3/4) humide ; brun intense (7,5 YR 5/8) sec.

IIB5 (385/470) Brun rougeâtre (5 YR 5-4/4) humide ; brun intense (7,5 YR 5/8) sec ; les autres caractères de ces trois horizons sont très similaires : texture argileuse ; structure polyédrique à tendance cubique en certaines zones ; quelques points blanchâtres et cristaux de feldspath de petite taille, la proportion de ce minéral augmentant en profondeur ; réaction positive au NaF.

IIB6 (470-520) Brun brillant (7,5 YR 5/6-8) humide ; jaune, brunâtre (10 YR 6/6) sec ; très friable à l'état humide, durcit en séchant, bien que la pression des doigts donne un matériau pulvérulent ; porosité élevée ; à l'état sec forme une masse durcie ; très abondants cristaux de feldspaths potassiques, certains de grande taille ; on observe des concrétions de gibbsite dans les zones exposées à l'air, certaines de 1 cm ; réaction positive au NaF.

IIB7 (520/560) Brun rougeâtre foncé (5 YR 3/4) humide ; brun (7,5 YR 5/4) sec ; texture argileuse ; structure polyédrique de type moyen ; consistance rigide ; cristaux de feldspaths potassiques et points blancs de gibbsite.

Episodes acides datés de 3,4 à 3,6 millions d'années.

IIIB (560/—) Brun rougeâtre foncé (2,5 YR 3/4) humide ; brun intense (7,5 YR 5/8) sec ; texture argileuse ; structure polyédrique moyenne ; très plastique et grande adhésivité ; quelques faces brillantes de petite taille ; taches grises, jaunâtres et rougeâtres qui correspondent à des minéraux très altérés ; en profondeur augmente le pourcentage de fragments de basaltes fortement altérés ; transition graduelle et irrégulière ; réaction négative avec NaF.

C Basalte très altéré avec structure encore conservée mais avec un haut degré d'argilification ; tonalité grisâtre, avec de multiples taches rougeâtres.

Basaltes datés entre 4,2 et 5,4 millions d'années.

Nous pensons que le sol intermédiaire (compris entre 120 et 560 cm) peut provenir d'une puissante accumulation de matériau pyroclastique acide, avec quelques variations de composition et de granulométrie au long du dépôt, et avec possibilité de contaminations basaltiques. Ces différents matériaux se traduisent aujourd'hui dans le profil par une superposition d'horizons. En tout cas, il est très difficile de parvenir à des conclusions définitives sur un processus de différenciation d'horizons dans cette partie du profil. Pour simplifier la description, nous avons considéré cette zone intermédiaire comme formée à partir d'un matériau pyroclastique commun, de nature phonolitique avec quelques contaminations basaltiques également pyroclastiques.

Si les horizons A et B du sol superficiel sont bien parallèles à la surface, les horizons situés entre 120 et 560 montrent une certaine inclinaison. Cela signifie que la masse de produits pyroclastiques s'est adaptée à la topographie existant à l'époque.

Nous soulignons les caractères de l'horizon B116 qui contient d'abondants cristaux de feldspaths potassiques en grande partie transformés en gibbsite. On observe des concrétions de ce minéral, de grande taille.

En-dessous de cet ensemble d'horizons apparaît un sol de caractères très différents des précédents et qui est formé à partir de basalte. On observe très bien le passage de l'altération de l'horizon IIB vers ce matériau. Bien que très altéré, le basalte conserve sa structure et montre un taux élevé d'argilification. L'horizon IIB

présente la couleur rougeâtre la plus intense du profil, avec des taches grisâtres et jaunâtres de minéraux altérables, ainsi que quelques « clay-skins ». Il est peu fréquent d'observer une altération aussi intense de coulées basaltiques. Les datations effectuées sur les basaltes de la zone considérée leur attribuent un âge compris entre 4,2 et 5,4 millions d'années.

En définitive, nous nous trouvons devant un sol superficiel andique formé à partir de cendres basaltiques qui enterre un sol profond formé fondamentalement à partir de matériaux acides, lui-même recouvrant un niveau de basaltes très altérés.

LES CARACTÈRES PHYSICO-CHIMIQUES

En ce qui concerne la matière organique (Tableau I), il y a très normalement une grande différence entre le sol superficiel (avec 10 % de carbone organique dans l'horizon A) et les sols enterrés. Dans ces derniers cependant, apparaissent encore des contenus appréciables de matière organique : ainsi, à 5 m de profondeur, dans l'horizon IIB₆, une valeur de 1,6 % doit être notée. Le fait que cette teneur de matière organique coïncide avec l'horizon le plus alumineux du profil nous fait penser à la possibilité de formation de complexes ayant mobilisé, stabilisé et accumulé la matière organique. La prédominance des acides fulviques est en accord avec cette considération.

TABLEAU I
Matière Organique. *Organic Matter*

HOR.	C %	M.O. %	N %	C/N	Humus (C %)	AH (C %)	AF (C %)	$\frac{AH}{AF}$
A ₁	10,1	17,37	1,7	5,94	4,12	1,90	2,16	0,91
B	2,3	3,95	0,5	4,6	0,89	0,32	0,57	0,56
IIB ₁	1,16	1,99	0,13	8,92	—	—	—	—
IIB ₂	0,80	1,37	0,09	8,80	0,07	0,04	0,03	1,33
IIB ₃	0,65	1,11	0,09	7,22	0,06	0	0,06	
IIB ₄	0,33	0,56	0,06	5,50	0,05	0	0,05	
IIB ₅	0,36	0,62	0,07	5,14	0,05	0	0,05	
IIB ₆	0,94	1,62	0,05	18,80	0,06	0	0,06	
IIB ₇	0,16	0,27	0,05	3,20	0,02	0	0,02	

L'ensemble du profil a une réaction acide (tabl. II) ; les pH les plus bas (4,6) sont ceux du sol profond, sur basalte, et les plus élevés (5,2-5,5) ceux du sol superficiel. Dans les horizons formés à partir des matériaux acides les pH oscillent entre 4,7 et 5,3.

En trois horizons seulement, la différence entre pH eau et KCl est supérieure à l'unité. Il est important de souligner que dans l'horizon IIB6 le pH KCl est supérieur à la valeur du pH eau. Cette particularité nous indique que cet horizon est pauvre en minéraux argileux et au contraire riche en hydroxydes. Effectivement, comme le précisera l'étude minéralogique, cet horizon renferme des quantités importantes d'hydroxyde d'aluminium.

La réaction au NaF en 2 minutes est très élevée dans le sol superficiel andique (11) et dans l'ensemble des horizons formés à partir de matériaux acides. Elle est pratiquement nulle dans le sol profond sur basalte.

Si l'on fait abstraction du sol superficiel andique, on observe une corrélation assez significative entre le contenu en gibbsite et les pH NaF. Les horizons les plus riches en cet hydroxyde présentent la réaction la plus intense, tandis que dans l'altération du basalte, où ce minéral n'apparaît pas, la valeur du pH NaF est plus basse.

En ce qui concerne le complexe d'échange, il existe aussi des différences entre les sols superposés (tabl. II).

TABLEAU II
Ph et complexe absorbant

HOR.	pH				Complexe Absorbant (meq/100 g) Exchange Complex										ECEC gr. arg.	ECEC gr. sol
	H ₂ O	KCl	NaF		Al ⁺⁺⁺	H ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	S	T	S/T	% meq/100		
			2'	60'												
A	5,2	4,3	11,0	11,4	1,5		4,2	2,3	1,2	0,9	8,6	49,9	17,3			
B	5,7	4,5	11,0	11,5	0,7		2,6	1,9	0,9	0,4	5,8	27,8	20,9	13,15	6,5	
IIB ₁	4,7	4,1	10,85	11,47	1,55	0,43	0,29	0,31	1,49	0,79	2,88	23,0	12,39	7,84	4,43	
IIB ₂	5,3	4,1	10,24	10,96	1,41	0,52	0,81	0,98	1,96	0,29	4,04	28,50	14,17	7,70	5,45	
IIB ₃	4,9	4,1	10,08	10,98	1,71	0,86	1,16	1,19	2,05	0,34	4,74	21,15	22,41	8,12	6,45	
IIB ₄	4,9	3,9	9,89	10,65	3,36	0,57	0,76	1,08	2,00	0,34	4,18	21,90	19,09	10,07	7,54	
IIB ₅	4,7	3,9	9,87	10,59	3,37	0,72	0,65	1,03	2,11	0,34	4,13	18,97	21,77	9,22	7,50	
IIB ₆	4,7	5,2	10,64	11,35	4,82	0,76	0,63	0,42	2,42	0,07	3,54	22,60	15,66	27,80	8,86	
IIB ₇	5,1	3,8	9,71	10,46	3,72	0,67	0,60	0,75	3,45	0,34	5,14	26,60	19,32	12,79	8,86	
IIIB	4,6	4,0	9,65	10,27	3,27	0,10	0,80	0,63	0,81	0,23	2,47	16,3	15,15	9,04	5,74	
C	4,6	3,9	9,67	10,25	5,40	1,25	0,74	0,41	1,52	0,09	2,76	16,06	17,18	23,31	8,16	

Dans le sol superficiel récent, le calcium est le cation prédominant, tandis que dans les autres sols c'est l'aluminium. Dans le sol profond, sur basalte, et dans l'horizon IIB6 du sol intermédiaire, la valeur de l'aluminium échangeable dépasse la somme des autres bases échangeables, avec des valeurs de 5,40 et de 4,82, ce qui risque de créer des phénomènes intenses de toxicité aluminique.

D'autre part, tandis que dans le sol superficiel le Ca⁺⁺ est le principal cation basique, dans les sols enterrés le Na⁺ représente, en moyenne, plus de la moitié de la somme des bases. Cette prédominance de Na⁺ par rapport aux autres bases échangeables est une

particularité importante que l'on observe dans la majeure partie des sols formés sur les matériaux anciens (sols ferrallitiques) aussi bien basiques que acides, qui sont situés dans la zone la plus humide de l'Archipel Canarien (TEJEDOR SALGUERO M.L., GARCIA LOPEZ L., FERNANDEZ CALDAS E., 1984). Nous attribuons cette particularité à une influence marine permanente exercée par les eaux de pluies et de condensations, dans la zone des nuages où se trouve le sol.

La capacité d'échange à pH 7 est importante dans le sol superficiel, à cause des fortes teneurs en matière organique et en complexes organo-minéraux. Dans l'ensemble des horizons issus de matériaux acides, la

capacité d'échange oscille autour de 23 meq/100 gr. Les valeurs les plus basses (16 meq/100 gr) se rencontrent, en profondeur, dans l'altération du basalte. A l'exception du sol récent, la capacité d'échange effective est inférieure à 10 meq/100 gr de sol, et inférieure à 12 meq/100 gr d'argile, sauf dans les horizons IIB6 sur matériel acide et dans l'altération du basalte, horizons pour lesquels existe un problème de dispersion.

L'ensemble du profil est fortement désaturé.

L'analyse totale du sol par voie triacide (tabl. III) met en évidence des différences importantes, qui en définitive reflètent les diverses natures des matériaux originels.

Dans les horizons formés à partir de matériaux acides, l'aluminium est l'élément dominant ; les teneurs sont presque toujours légèrement supérieures à celles de la silice et très nettement supérieures à celles du fer. Elles oscillent entre 27,07 % et 40,91 %, tandis que Fe_2O_3 est compris entre 8,32 % et 13,16 %. Quant au TiO_2 , il varie entre 1,67 % et 5,05 %.

Au contraire, dans le sol profond formé à partir de basaltes, les valeurs de Al_2O_3 sont plus basses (23,7 % à 25,3 %), alors que celles de Fe_2O_3 (20 % à 24 %) et TiO_2 (8 %) sont beaucoup plus élevées.

Le pourcentage de silice des constituants secondaires dans les horizons sur matériaux acides est sensiblement inférieur à ce qui s'observe dans les horizons sur

matériaux basiques. La valeur la plus basse apparaît dans l'horizon IIB6, qui est précisément le plus alumineux.

Il y a également une différence dans le contenu en ions alcalins et spécialement pour le potassium. Les horizons formés sur basalte ont de très faibles taux de K_2O , tandis que les horizons acides dépassent toujours 1 % à l'exception de l'horizon IIB6 dans lequel on n'a détecté ni illite ni illite-vermiculite.

Le pourcentage de résidus marque également une différence entre ces deux sols. Les horizons acides donnent des valeurs sensiblement plus élevées que les horizons formés sur matériaux basaltiques, en raison de l'existence de quantités importantes de quartz et de feldspaths potassiques, minéraux très résistants à l'altération.

Le tableau IV rassemble les résultats de l'analyse chimique du résidu de ces horizons. On peut y remarquer la prédominance de la silice, que suivent avec un grand écart l'aluminium, le potassium puis le sodium. En calculant le pourcentage de quartz à partir de ces valeurs, il apparaît que ce minéral constitue plus de 80 % du résidu de tous les horizons, à l'exception de l'horizon IIB6 où quartz et feldspaths potassiques sont en proportions similaires. Il est curieux de noter que c'est précisément cet horizon qui possède le plus faible pourcentage de résidus, parmi tous les horizons acides.

Dans l'ensemble du profil, l'horizon IIB6 est aussi

TABLEAU III
Analyse totale (%). *Total analysis*

HOR.	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	Mn_3O_4	K_2O	MgO	CaO	Na_2O	Résidus	PERTE SiO_2^*				SiO_2
											105°— 1.000°	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	
IIB ₁	23,23	28,90	13,16	4,30	0,13	3,46	0,19	—	0,47	21,89	7,21	1,35	4,68	7,19	0,92
IIB ₂	26,07	27,07	8,74	3,94	0,18	2,52	0,63	—	0,46	12,80	11,42	1,63	7,92	8,79	1,14
IIB ₃	23,60	30,49	12,66	5,05	0,19	2,38	0,30	—	0,22	18,95	9,18	1,30	4,96	6,21	0,89
IIB ₄	25,83	31,05	10,63	3,95	0,19	2,82	0,23	—	0,20	19,36	9,74	1,41	6,51	8,69	1,02
IIB ₅	27,32	33,16	11,63	2,88	0,22	1,52	0,16	—	0,10	13,91	10,58	1,39	6,24	12,61	1,04
IIB ₆	12,32	40,91	8,32	1,67	0,29	0,18	0,008	—	0,04	5,50	22,37	0,50	3,93	9,84	0,42
IIB ₇	34,80	32,92	8,37	2,04	0,18	1,93	0,10	—	0,12	10,41	10,16	1,79	11,04	22,65	1,44
IIIB	37,27	23,73	20,14	8,16	0,12	0,91	0,41	—	0,12	5,51	10,69	2,66	4,91	6,08	1,34
C	29,45	25,29	24,51	8,29	0,18	0,05	0,61	—	0,20	1,98	10,28	1,98	3,27	4,76	0,97

*Rapports moléculaires.

TABLEAU IV
Analyse des résidus (%). *Analysis of residue*

HOR.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	Mn ₃ O ₄	K ₂ O	MgO	CaO	Na ₂ O
IIB ₁	94,74	1,98	0,16	0,19	—	1,67	—	0,02	1,03
IIB ₂	95,17	1,92	0,11	0,11	—	1,74	0,03	0,01	0,90
IIB ₃	95,95	1,51	0,17	0,28	—	1,15	—	0,07	0,85
IIB ₄	96,56	1,07	0,10	0,12	—	1,05	0,22	0,06	0,80
IIB ₅	92,41	2,14	0,30	0,29	—	3,92	0,18	0,06	0,70
IIB ₆	74,03	10,47	0,51	0,61	—	8,25	0,24	0,07	5,80
IIB ₇	92,02	2,53	0,47	0,47	—	2,04	0,22	0,06	1,47

celui qui a la plus grande perte d'eau entre 105° et 1.000° C, caractère qui nous indique l'existence de substances hautement hygroscopiques.

Les hautes teneurs d'aluminium observées dans les horizons sur matériaux acides se traduisent par des relations moléculaires silice/alumine comprises entre 0,5 et 1,79. Il faut remarquer que c'est l'horizon IIB₆ qui a la valeur la plus basse (0,5). Les horizons profonds sur basalte ont des valeurs plus élevées, pouvant dépasser la valeur 2.

Le rapport silice/sesquioxydes est dans tous les cas inférieurs à l'unité. Il indique aussi une évolution très accusée de ces sols.

Le tableau V reproduit les résultats de l'analyse granulométrique. En général prédomine la fraction inférieure à 2 μ, spécialement dans les sols enterrés, caractère qui indique sa profonde altération. Pour certains

horizons, il a été difficile d'obtenir une bonne dispersion avec l'hexémétaphosphate de soude, spécialement dans l'horizon IIB₆ et dans le niveau d'altération du basalte. Pour le premier de ceux-ci, il a fallu recourir à un traitement de 2 minutes par les ultrasons, avant ajustement au pH 3,5.

En général les pourcentages de sable sont faibles. Cependant, dans l'horizon IIB₆ une valeur de 39 % de sable a été obtenue, ce qui est peu cohérent avec le pourcentage de résidu donné par l'analyse totale. Ce pourcentage était plus faible pour l'horizon IIB₆ que pour tous les autres horizons issus de matériaux saliques.

L'analyse par diffraction de Rayons X de la fraction sableuse indique la présence de gibbsite et de feldspaths potassique. Il existe donc une proportion importante de produits secondaires, formant pseudosables, à côté des minéraux résiduels du matériau d'origine.

TABLEAU V
Analyse granulométrique. *Mechanical analysis*

HORIZONS	ARGILE < 2 μ	LIMON FIN 2 — 20 μ	LIMON GROSSIER 20 — 50 μ	SABLE FIN 50 — 200 μ	SABLE GROSSIER 200 μ — 2 mm
A		94,3		3,8	1,9
B	49,4		36,8	8,4	5,4
IIB ₁	56,5	26,5	10	1,52	2,20
IIB ₂	69,9		22,77	5,36	7,29
IIB ₃	79,4		21,25	2,10	1,42
IIB ₄	74,82		18,42	1,86	1,68
IIB ₅	81,35		14,47	1,47	1,64
IIB ₆	30,00	18,5	7,5	25,93	13,16
IIB ₇	69,27		19,30	3,65	4,78
IIIB	63,50	19,5	7	9,63	1,98
C	35	38	15	5,04	3,92

LES CARACTÈRES MINÉRALOGIQUES

L'analyse minéralogique de la fraction sableuse souligne également les disparités existant entre les sols formés sur matériaux acides et ceux formés sur matériaux basiques. Sur les matériaux acides, c'est toujours la fraction légère qui prédomine, alors que la fraction lourde est toujours la plus importante sur matériaux basiques.

Sauf pour le sol superficiel le plus récent, il a été impossible de calculer les pourcentages des différents minéraux de la fraction dense, en raison de l'abondance des grains opaques. La magnétite est le minéral dominant dans cette fraction. Bien que les opaques d'altération ferrifères et ferro-titanifères se détectent dans la totalité du profil, c'est seulement dans les horizons sur matériaux basiques (superficiels ou profonds) qu'ils sont largement représentés.

A l'exception du sol superficiel où l'on rencontre pyroxènes, olivines et amphiboles, les minéraux transparents sont insignifiants dans le reste du profil. Habituellement, lorsque l'un d'eux apparaît il est très altéré.

Pour la fraction légère, dans les sols sur matériaux basaltiques (sol superficiel et sol profond), s'observe une dominance absolue des grains altérés et d'identification difficile. Par contre, dans les horizons sur matériau acide (sol intermédiaire), bien qu'il y ait aussi prédominance de grains altérés, on identifie toujours des feldspaths. Il s'agit de feldspaths potassiques, identifiés dans leur majorité comme sanidine. En général, ils sont corrodés par de profondes fissures. On observe aussi des plagioclases, moins abondants que les précédents ; ils se présentent en petits cristaux, avec d'importants symptômes d'altération.

L'étude de la totalité du sol par diffraction de Rayons X fait ressortir comme minéraux principaux (exception faite des argiles) le quartz et la gibbsite.

Le quartz est identifié dans tout le profil, à l'exception de l'altération du basalte à la base du profil. Cependant, le sol intermédiaire formé sur matériau acide possède les plus grandes proportions de ce minéral. Une exception se produit dans l'horizon IIB6, qui contient moins de quartz.

La gibbsite se rencontre uniquement dans le sol formé sur matériau acide. Sa présence n'a pas été détectée dans les sols basaltiques de surface et de profondeur. Dans le sol intermédiaire, la gibbsite est toujours présente, mais selon des proportions variables. Sans aucun doute, l'horizon IIB6 est celui qui en contient la plus grande quantité. Il est intéressant de souligner que c'est cet horizon qui est le moins riche en quartz.

Quant aux minéraux ferrugineux, ils n'existent en quantités décelables que dans l'altération du basalte à la base du profil. Il s'agit d'hématite et de goethite.

Pour l'étude de la fraction argileuse, il faut tenir

compte de la très forte altération des sols. Les diagrammes de la fraction argileuse sont très similaires à ceux du sol total.

Le quartz et la gibbsite sont bien représentés dans le sol formé à partir de matériaux acides. Les minéraux ferrugineux (hématite et goethite) apparaissent uniquement dans l'altération du basalte.

Tout au long du profil, on observe un mélange d'argiles 1 : 1 et 2 : 1. Le sol superficiel est constitué de métahalloysite et d'illite, avec une prédominance de la première. Dans les cinq premiers horizons sur matériaux acides, on observe un mélange de kaolinite, illite et vermiculite. L'illite est ouverte et présente une bande entre 10 et 14 Å. Ceci fait penser qu'il s'est produit une perte de potassium, avec transformation de l'illite en vermiculite. Dans l'horizon IIB6, qui est riche en hydroxydes d'aluminium, nous n'avons pas détecté de minéraux argileux. L'horizon IIB7 est constitué par de l'halloysite hydratée et par de l'illite. Enfin, dans le sol profond sur basalte, les argiles 1 : 1 (halloysites hydratées) deviennent prédominantes, en association avec des traces d'illite.

L'étude micromorphologique (RODRIGUEZ, et al. 1984) met en évidence la superposition des pédogenèses.

On observe clairement que le sol intermédiaire provient de matériaux acides avec prédominance de micas et de sanidines tabulaires se transformant en pseudomorphoses de gibbsite, avec certains éléments allochtones, comme des fragments de basaltes très altérés. Des fragments de cendres phonolitiques transformés intégralement en gibbsite sont également inclus en certains de ces horizons. Bien que moins fréquemment, on observe aussi des recristallisations et nodules de ce minéral.

Au contraire, le sol profond (horizons IIIB et C) s'est formé à partir d'un basalte à olivine. Les éléments grossiers sont des fragments de basalte très altérés et ferruginisés. On ne rencontre pas de micas. Les phénocristaux d'augite et d'olivine sont complètement transformés en substances ferrugineuses et en une masse argileuse. Ce n'est que dans les horizons profonds basaltiques que l'on observe des ferranes et ferri-argilanes, généralement très fragmentées et intégrées dans la masse fine de l'horizon IIIB. Elles occupent, dans cet horizon, environ 1 % de la superficie des lames minces. Dans l'horizon C, on observe des cutanes dans toutes les fissures du basalte. Dans les horizons IIB7 et IIIB existent aussi des papules argileuses, très vieilles.

Le sol superficiel présente les caractères micromorphologiques typiques d'un sol andique. Bien que formé fondamentalement à partir de cendres basaltiques, il présente aussi quelques contaminations. Il est fréquent de trouver dans ce sol superficiel des fragments de roches d'origines diverses. Ainsi des fragments frais et des cristaux d'olivine sains coexistent avec d'autres débris très

altérés (TEJEDOR SALGUERO, M.L. ; BENAYAS, J., FERNANDEZ CALDAS, E. 1975).

INTERPRÉTATION ET CONCLUSION

L'étude de ce profil complexe nous permet, en premier lieu, d'émettre quelques hypothèses sur l'évolution des sols formés sur matériaux acides (phonolitiques) ou basiques (basaltiques), dans des conditions d'humidité maximale pour l'archipel des Canaries, c'est-à-dire sous un régime hydrique de type « udique ».

Comme nous l'avons déjà indiqué, le sol superficiel présente des caractères de sol andique ; il correspondrait, selon certaines études précédentes (FERNANDEZ CALDAS *et al.*, 1975 ; Departamento de Edafologia, 1984), à un sol brun andique, dont l'âge a été estimé à 9.000 ans approximativement (QUANTIN *et al.*, 1975). Il diffère fondamentalement des sols plus profonds à caractère ferrallitique bien marqué, par la nature des complexes organominéraux qu'il recèle. Les teneurs en aluminium soluble dans l'oxalate à pH3 permettent de le classer dans le sous-ordre des Allands (1), bien qu'il présente des caractéristiques d'un andisol très évolué « en transition » avec les sols plus profonds à caractère ferrallitique.

Il ne faut pas perdre de vue en effet que la tendance pédogénétique générale qui affecte les deux grandes catégories de matériaux d'âges très différents peut se confondre avec une évolution géochimique de type ferrallitique : perte de silice, accumulation d'oxydes et d'hydroxydes et éventuellement formation d'argiles 1 : 1. Toutefois l'importance relative des divers oxyhydroxydes diffère notablement d'une catégorie de matériaux à l'autre : dans les sols développés sur matériaux basiques (coulées de basalte en profondeur, cendres basaltiques en surface) il n'a pas été détecté d'hydroxydes d'aluminium en quantités significatives, alors que les oxydes de fer et de titane sont relativement abondants ; inversement, dans les sols formés sur matériaux acides (phonolitiques) prédominent les hydroxydes d'aluminium (gibbsite), alors que les oxyhydroxydes de fer secondaires ne sont que faiblement individualisés ; ces derniers sols suivraient plutôt une évolution de type « allitique » (PEDRO, 1964 ; PEDRO *et al.*, 1974).

Il paraît également intéressant de souligner que la transformation massive des cendres acides en gibbsite a lieu exclusivement dans cette zone humide ; les observations menées dans un contexte climatique plus contrasté de type méditerranéen, mettent en évidence la formation prédominante d'argiles halloysitiques et non de gibbsite. Par ailleurs, il est à noter que ces sols formés à

partir de matériaux originellement riches en silice renferment cet élément, dans les composés secondaires, en proportion plus faible que dans les sols dérivés de matériaux basaltiques ; il y a une moindre formation d'argiles et même, dans certains cas, le contenu minéralogique se réduit à des hydroxydes d'aluminium amorphes ou cristallins. Il semblerait donc que les faibles quantités de fer libérées par ces matériaux ne soient pas suffisantes pour stabiliser les argiles et que, en conséquence, la libération et l'individualisation d'alumine comme la perte de silice s'en trouvent favorisées. Au contraire, les matériaux basaltiques, plus riches en fer, pourraient, en facilitant la formation d'argiles, limiter l'élimination de la silice.

Pour ce qui concerne la présence d'illite et de vermiculite dans le sol sur matériau acide, dans un milieu qui favorise la formation de gibbsite, nous l'attribuons à l'évolution des micas présents dans les matériaux phonolitiques, conjointement à l'abondance des ions K dans les feldspaths potassiques ; l'illite apparaît ouverte montrant bien sa transformation en vermiculite ; il s'agirait donc de minéraux « appelés à disparaître » à mesure que progresse l'altération.

En second lieu, s'il y a eu dans ces régions des variations climatiques au cours du Quaternaire (ROGNON, 1976), variations que semble confirmer l'existence de sols « climatiquement déphasés », tels les vertisols et les sols ferrallitiques fossiles de Fuerteventura actuellement sous climat aride (FERNANDEZ CALDAS *et al.*, 1986), il n'en demeure pas moins que le régime d'humidité de la zone étudiée, de type udique, reste compatible avec une altération de type ferrallitique, d'ailleurs observée sur les versants nord des îles montagneuses. Cela nous conduit à supposer que, dans cette partie montagneuse de l'archipel canarien, l'amplitude des variations des principaux paramètres climatiques n'a été que relativement modérée (FERNANDEZ CALDAS *et al.*, 1983).

Enfin, du fait que les sols développés dans des altérations de matériaux acides « pyroclastiques » suivent une évolution semblable à celle qui a été observée dans des altérations de matériaux acides « consolidés » (Ile de la Gomera), il est permis de penser que, dans les conditions climatiques des îles Canaries, la composition du matériau originel a une plus grande influence sur les caractéristiques des produits d'altération que le degré de consolidation de la roche-mère ; ce dernier facteur exercerait seulement une influence sur la vitesse du processus (JIMENEZ MENDOZA, 1986).

MÉTHODES ANALYTIQUES

— La matière organique a été déterminée par la méthode de Walkley-Black. Pour le fractionnement des acides humiques,

(1) Voir proposition du groupe ICOMAND (International Committee for the classification of Andisols).

nous avons suivi la méthode de Kononova (KONONOVA, 1968). — Le pH a été mesuré en suspension aqueuse (1/2,5), en KCl (N) (1/2,5), et dans une solution entre neutre de NaF (N) (1/50) (FIELDES et PERROTT, 1966). — Les cations échangeables ont été déterminés par l'acétate d'ammonium (BOWER *et al.*, 1952). Ca et Mg ont été dosés par Absorption Atomique, Na et K par spectrophotométrie d'émission. — La capacité d'échange effective (ECEC) a été calculée par addition des bases extraites par l'acétate d'ammonium et de l'aluminium extrait par le KCl 1N.

— L'azote total a été dosé par colorimétrie (Technicon II) après minéralisation avec H₂SO₄ et un catalyseur (K₂SO₄ + HgO).

— L'analyse mécanique a été réalisée par dispersion à l'hexamétaphosphate de sodium, et un prétraitement à l'eau oxygénée. Dans certains cas on a dispersé à l'aide des ultrasons. — L'analyse totale a été réalisée par la méthode triacide.

Manuscrit accepté par le Comité de Rédaction le 23 mars 1986.

BIBLIOGRAPHIE

- ABDEL-MONEM, WATKINS (S.D.), GAST (P.W.), 1972. — Potassium-Argon ages Volcanic stratigraphy and magnetic polarity history of Canary Islands : Tenerife, La Palma and Hierro. *Amer. Journal of Soil Sci.*, vol. 272 : 805-825.
- AUBERT (G.) SEGALÉN (P.), 1966. — Les sols ferrallitiques. *Cah. ORSTOM, Sér. Pédol.*, vol IV, n° 4, p. 3.
- CARRACEDO GOMEZ (J.C.), 1980. — Atlas básico de Canarias. Editorial Interinsular Canaria : 17-27.
- CHATELIN (Y.), 1972. — Les sols ferrallitiques. Tome I. Historique développement des connaissances et formations des concepts actuels. *Init. et Doc. tech. ORSTOM* n° 20, 98 p.
- CHATELIN (Y.), 1974. — Les sols ferrallitiques. Tome III. L'Altération. *Init. et Doc. tech. ORSTOM*, n° 24, 144 p.
- Departamento de Edafología, 1984. — Guía de Campo. Congreso Internacional de suelos volcánicos. Tenerife 1984.
- FERNANDEZ CALDAS (E.), TEJEDOR SALGUERO (M.L.), 1975. — Andosoles de las Islas Canarias. Servicio de publicaciones de la Caja General de Ahorros de Santa Cruz de Tenerife, p. 207.
- FERNANDEZ CALDAS (E.), TEJEDOR SALGUERO (M.L.), POMEL (R.S.), 1983. — Séquence de sols et Paleosols du Nord de Ténérife. Publication de Commission de Géomorphologie de reliefs volcaniques, Clermont-Ferrand.
- FERNANDEZ CALDAS (E.), TEJEDOR SALGUERO (M.L.), QUANTIN (P.), 1978. — Séquence climatique des sols anciens de la région septentrionale de Ténérife (Iles Canarias). 1^{re} Partie : Caractéristiques morphologiques et physico-chimiques ». *Cah. ORSTOM, Sér. Pédol.* vol. XVII, n° 1 : 37-46.
- FERNANDEZ CALDAS (E.), TEJEDOR SALGUERO (M.L.), QUANTIN (P.), 1983. — Suelos de regiones volcánicas. Tenerife. Islas Canarias. Colección Viera y Clavijo (IV) 250 p.
- FERNANDEZ CALDAS (E.) DE LA CRUZ (M.), JIMENEZ (C.), TEJEDOR SALGUERO (M.L.), 1986. — Suelos de la Isla de Fuerteventura. Departamento de Edafología. Universidad de La Laguna.
- JIMENEZ MENDOZA (C.), 1986. — Suelos de la Isla de Gomera. Tesis Doctoral. Universidad de La Laguna.
- PEDRO (G.), 1964. — Contribution à l'étude expérimentale de l'altération géochimique des roches cristallines. Thèse Fac. Sci., Paris, 334 p.
- PEDRO (G.), SEDDOH (F.K.), DELMAS (A.B.7), 1974. — Sur la présence de gibbsite dans les arènes granitiques des pays tempérés et la mise en évidence d'un phénomène hydrolytique C.R. Ac. Sc. t. 279, série D, n° 26.
- QUANTIN (P.), FERNANDEZ CALDAS (E.), GUTIERREZ JEREZ (F.), TEJEDOR SALGUERO (M.L.), DELIBRIAS (G.), 1975. — Problème du rajeunissement des sols issus de l'altération de roches volcaniques, par des éruptions récentes de cendres, aux Nouvelles-Hébrides et aux Iles Canarias. *Bull. Asso. Geogr. Franc.*, 426, 211-217.
- RODRIGUEZ RORDRIGUEZ (A.) *et al.*, 1984. — Micromorphology of volcanic material derived ferrallitic soils in Canary Islands (Spain). Int. Working Meeting on Soil Micromorphology, Paris-France, 1985 (*in press*).
- ROGNON (P.), 1976. — Oscillations climatiques on Sahara depuis 40.000 ans. *Rev. de Geol. phys. et geol. dynamique* n° 5, p. XVIII : 2-3.
- TEJEDOR SALGUERO (M.L.), BENAYAS (J.), FERNANDEZ CALDAS (E.), 1975. — Estudio físico-químico y micromorfológico de intergrado Andosol-Tierra Parda Oligotrófica de un perfil complejo. *Anales de Edafología y Agrobiología* T. XXXIV, n° 9-10 : 813-827.
- TEJEDOR SALGUERO (M.L.), QUANTIN (P.), FERNANDEZ CALDAS (E.), (1978). — Séquence climatique des sols anciens de la région septentrionale de Ténérife (Iles Canarias) 2^e Partie : Caractéristiques minéralogiques, interprétation et classification. *Cah. ORSTOM. Sér. Pédol.* XVII, n° 2 : 119-127.
- TEJEDOR SALGUERO (M.L.), QUANTIN (P.), FERNANDEZ CALDAS (E.), 1979. — Séquence climatique des sols anciens de la région septentrionale de Ténérife, 3^e partie : Typologie, pédogénèse et classification. *Cah. ORSTOM, Sér. Pédol.* vol. XVII, n° 3 : 185-193.
- TEJEDOR SALGUERO (M.L.), GARCIA LOPEZ (L.), FERNANDEZ CALDAS (E.), 1984-1985. — Les sols ferrallitiques des Iles Canarias (Espagne). *Cah. ORSTOM. Sér. Pédol.*, vol. XXI, n° 1 : 109-116.