

Sobre la valoración geocológica de regiones secas tropicales/subtropicales. El ejemplo del Sahara

WILHELM LAUER *

Universidad de Bonn, Alemania

RESUMEN

Muchas regiones secas de la tierra se ubican en la zona de transición entre los trópicos y los subtropicos. Para la evaluación de estas regiones climáticas secas deben considerarse las condiciones geocologicas.

W. Lauer y P. Frankenberg (1977) pudieron definir, a partir de un análisis florístico del Sahara (Frankenberg 1978), una división geobotánica entre los trópicos y subtropicos. Este límite pasa por medio del Sahara. Su trazado actual es el resultado de la evolución climática desde la última época glacial y no es, en absoluto, completamente estable. Se muestra en detalle que el mundo vegetal de los trópicos secos (p.e. en la zona del Sahel) reacciona muy rápido frente a variaciones térmicas e hígricas del clima. El elemento florístico tropical está, por consiguiente, afecto a fluctuaciones espaciales más intensas y tiene un comportamiento relativamente regresivo frente a las influencias climáticas. Por el contrario, la flora holártica utiliza estas oscilaciones del clima para penetrar el medio árido del Sahara y de ahí que sea más bien un elemento florístico progresivo.

La fluctuación del límite geobotánico de los trópicos desde la última época glacial es analizado en el contexto de la evolución climática de los últimos 45.000 años. Se pone de evidencia así que la evaluación ecológica de estos espacios debe ser reafirmada desde un punto de vista climático y vegetal.

ZUSAMMENFASSUNG

Viele Trockengebiete der Erde liegen in der Übergangszone zwischen den Tropen und Subtropen. Für die Bewertung dieser klimatisch unterschiedlichen Trockenräume müssen die geokologischen Bedingungen berücksichtigt werden.

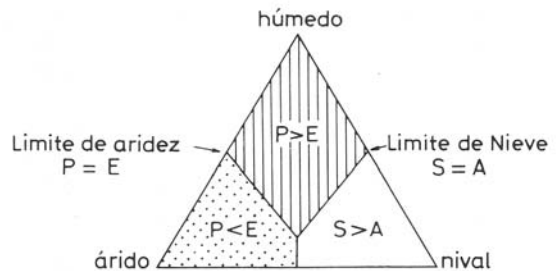
Anhand einer floristischen Analyse der Sahara (Frankenberg 1978) haben W. Lauer und P. Frankenberg (1977) eine geobotanische Grenze zwischen den Tropen und Subtropen definiert. Sie verläuft mitten durch die Sahara. Diese Grenze ist in ihrem heutigen Verlauf das Ergebnis der klimatischen Entwicklung seit der letzten Eiszeit und keineswegs völlig stabil. Im einzelnen wird gezeigt, dass die Pflanzenwelt der trockenen Tropen sehr rasch (z. B. in der Sahelzone) auf Änderungen sowohl des thermischen als auch des hygrischen Klimas reagiert. Das tropische Florenelement ist dadurch stärkeren räumlichen Fluktuationen unterworfen und verhält sich gegenüber den klimatischen Einflüssen relativ regressiv. Die holarktische Flora dagegen nutzt die Schwankungen des Klimas dazu aus, in die aride Umwelt der Sahara einzudringen und ist daher eher ein progressives Florenelement.

Die Fluktuation der geobotanischen Tropengrenze seit der letzten Eiszeit wird im Kontext der klimatischen Entwicklung der letzten 45.000 Jahre dargelegt und damit gezeigt, dass die ökologische Bewertung dieses Raumes klimatisch und vegetationskundlich abgesichert werden muss.

INTRODUCCION

En la tierra se pueden distinguir tres grandes reinos del clima: el húmedo, el nival, el árido. El reino húmedo y nival muestran un superávit de precipitación; el húmedo, uno en forma líquida, y el nival un superávit en forma sólida (nieve y hielo). El reino del clima árido está caracterizado por déficit de agua. Estos tres reinos climáticos están definidos por límites muy marcados (figura 1).

1. El límite de aridez entre el reino húmedo y nival, por una parte, y el reino árido, por otra.
2. El límite nival que separa, por un lado, las regiones húmedas y áridas, y por otro, las regiones nivales.



P = Precipitación pluvial S = Precipitación nival
E = Evaporación potencial A = Ablación glacial

Figura 1: Regiones climáticas de la tierra (esquemático).

La figura 1 muestra lo anterior en forma esquemática en un triángulo de referencia. En las regiones húmedas se cumple la ecuación Precipitación > Evaporación potencial, mientras que en

* Conferencia dictada en el Congreso sobre Zonas Áridas (PRIZAS), en La Serena, Chile, enero de 1980.

regiones áridas la ecuación es $P < E$ potencial. Por lo tanto, en el límite de aridez la ecuación es $P = E$.

Regiones secas se encuentran en los trópicos, subtropicos, latitudes templadas, zonas subpolares y polares (figura 2).

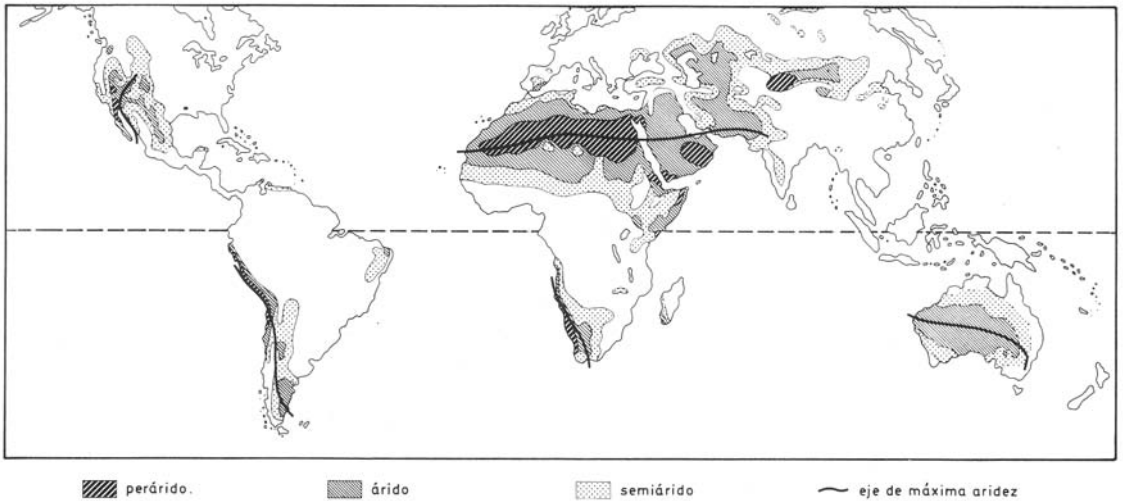


Figura 2: Distribución de las regiones secas de la tierra.

Entre ellas, las regiones semiáridas resultan especialmente problemáticas en el sentido que su temática es discutida hoy en el mundo entero. Su balance hídrico no es completamente negativo en todas las épocas del año y en ellas se encuentran paisajes cultivados o, por lo menos, se pueden desarrollar paisajes semicultivados. Justamente en las regiones semiáridas de la tierra se ubican graneros explotados extensivamente y se desarrolla un pastoreo. Desde el punto de vista climático son a menudo áreas de riesgos, ya que las más leves oscilaciones climáticas pueden ser muy efectivas y estas áreas pertenecen frecuentemente a las regiones más pobladas de la tierra.

Las regiones secas y sus subregiones son definidas, en general, en términos hídricos. El balance hídrico es tomado como criterio. Las regiones secas están comprendidas bajo la denominación de climas B en la mundialmente conocida clasificación de W. Köppen. Las primeras dos letras de su subdivisión (por ej. BW, BS) se refieren salamente a las características hídricas de estas regiones, sin consideración de las zonas climáticas térmicas. Los climas B se encuentran en todas las regiones climáticas térmicas de la tierra (figura 3). Köppen distingue gruesamente entre desiertos o estepas cálidas y frías recién con la tercera letra, por ejemplo h (=cálido) y k (=frío). Por consiguiente, grandes regiones secas -como por ejemplo el Sahara- están designadas unitariamente tanto en su margen septentrional como en el meridional (B S h) (figura 3).

De este modo, no se distingue entre el sector polar y el ecuatorial de este inmenso cinturón

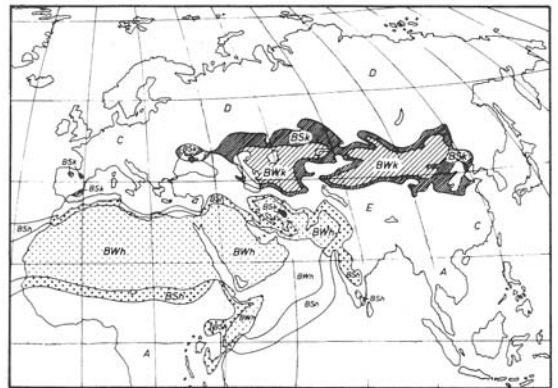


Figura 3: División de las regiones áridas del Viejo Mundo sg. la clasificación de Köppen (tomada de Blüthgen 1974).

seco en el reino del alisio, a pesar que en estos desiertos de alisios reinan características térmicas, atmosféricas y geobotánicas absolutamente diversas. Es precisamente en estas regiones secas, como por ejemplo el Sahara, el Kalahari, el Namib, Atacama y el gran desierto australiano, el desierto de Sonora, el desierto de Gila y Mohave en Norteamérica, donde se produce la transición entre los trópicos y las regiones extratropicales, en especial hacia los subtropicos mediterráneos, húmedos en invierno. Para valorar y, por consiguiente, reconocer la actual problemática de la desertificación de estas regiones, es que resulta de primordial importancia el conocimiento de los sectores tropicales y no tropicales de este espacio y en el tiempo.

Regiones florísticas del Sahara y sus límites

A través de esta breve exposición quisiera presentar algunos resultados de investigaciones que ilustran la transición entre la región tropical y la extratropical en el Sahara y por medio de las cuales la valoración de este macroespacio sahariano adquiere otra perspectiva. La línea que corre por el Sahara (véase figura 2) marca, en este desierto más extenso del mundo, no solamente la zona máxima de aridez, sino también otros factores significativos geoeológicos.

1. Desde el punto de vista térmico se produce la transición de los trópicos hacia los subtropicos.

2. El régimen de precipitación varía -si bien en valores muy leves-, pasando de lluvias estivales a lluvias invernales.

Las lluvias estivales tienen su causa en un avance de la Línea Intertropical de Convergencia (ITC) desde la región ecuatorial, mientras que las precipitaciones invernales son debidas a frentes subpolares en el lado polar de estos ejes.

3. Las líneas señaladas dividen también los areales de los elementos florísticos tropicales y extratropicales. Esto resulta especialmente nítido en el Sahara, donde el areal florístico holártico pasa gradualmente al paleotropical.

4. Conjuntamente con esta línea coincide también el límite absoluto de las heladas, así como un déficit generalizado de calor. Esta separa a los trópicos -aquellas regiones en las que nunca llega el invierno- de las regiones extratropicales.

En el Sahara se produce la transición entre los trópicos y los subtropicos bajo condiciones extremadamente áridas. Por consiguiente, resulta muy difícil fijar el trazado del límite entre el holártico y el paleotropical. Las clasificaciones climáticas, concebidas bajo una fuerte consideración del mundo vegetal, no contienen trazados definidos de los límites, a consecuencia de la insuficiente diferenciación entre asociaciones vegetales tropicales y no tropicales. Esto se explica, principalmente, debido a que los geobotánicos han utilizado para la división las formas de vida vegetal de las regiones secas preferentemente y que están determinadas por el déficit de agua, mientras que las implicancias que las características de calor (temperatura) tienen para las plantas no han sido suficientemente incorporadas.

El estudio de la flora muestra claramente que en el Sahara existen elementos florísticos tropicales que irrumpen bastante hacia el interior del desierto, bastante más allá de la línea que marca el límite de aridez, donde se encuentran en equilibrio la precipitación y la evaporación. De

manera similar, plantas holárticas irrumpen bastante en las regiones secas (figura 4).

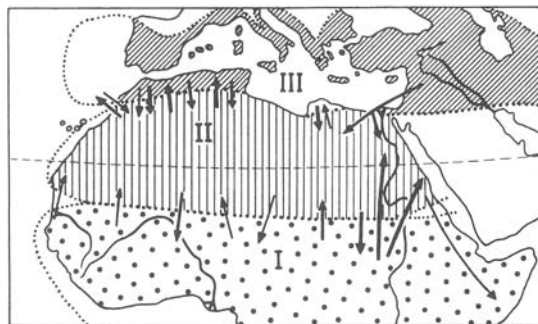


Figura 4: Los tipos areales florísticos en Africa meridional

I tipo areal tropical

II tipo areal saharo-arábico

III tipo areal mediterráneo-marroquí-iranio/turanesio.

Las flechas indican influencias mútuas.

En un proyecto de investigación del Instituto de Geografía de la Universidad de Bonn se intentó determinar cuantitativamente y cartografiar la pertenencia del mundo vegetal a diferentes tipos de areales. Fue necesario apoyarse especialmente en geobotánicos franceses, quienes han trabajado muy bien las especies florísticas. Se determinaron espectros de tipos areales y dominancias florísticas por unidad de superficie de acuerdo a métodos estadísticos. De esta forma se determinaron areales y sus respectivos límites de dominancia de especies extratropicales, especies saharianas y especies tropicales (figura 4).

P. Frankenberg (1978) ha desglosado los elementos florísticos del Sahara y sus regiones marginales en base a 4.700 especies. Estos elementos florísticos han sido caracterizados como geoelementos en el sentido de Kleopow. Se refundieron miles de ubicaciones individuales, con la ayuda de un reticulado de una densidad de 80 km², a cerca de 800 ubicaciones principales. Para cada una de ellas fueron calculados espectros de geoelementos. Los siguientes geoelementos fueron desglosados:

El geoelemento extratropical (A), el geoelemento extratropical-sahariano (AS), el geoelemento sahariano (S), el geoelemento tropical-sahariano (TS) y el geoelemento tropical (T)

La representación cartográfica de estos geoelementos permitió la formación de regiones florísticas y de límites florísticos (figura 5).

Se puede observar que la dominancia casi exclusiva de la flora tropical termina en una línea

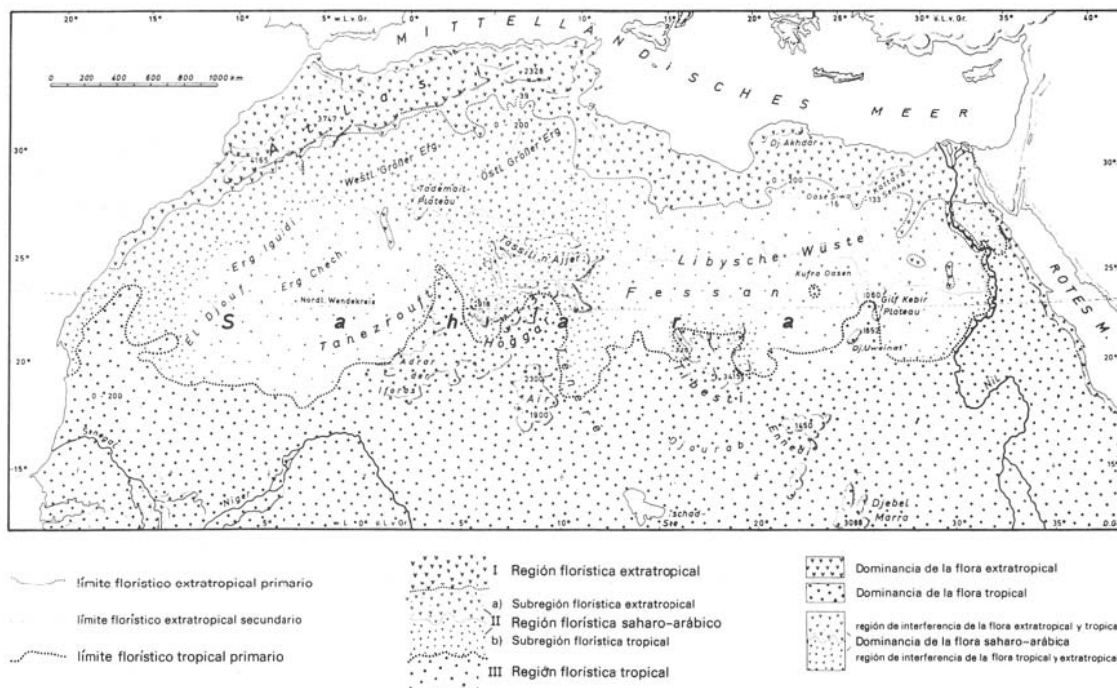


Figura 5: Límites florísticos y regiones florísticas en el Sahara según Lauer/Frankenberg.

que corre inmediatamente al sur del trópico de Cáncer (límite florístico tropical primario). El límite florístico tropical secundario - que corresponde al equilibrio entre los elementos florísticos tropicales y extra tropicales- corre ya bastante más al norte del trópico. Sólo tienen una característica claramente extratropicallos sectores al pie de los Atlas y las regiones costeras al Mar Mediterráneo. Naturalmente, en el medio del Sahara dominan claramente los goe elementos específicamente saharianos. Estos no serán considerados en esta ocasión, ya que no son relevantes dentro de esta problemática.

En forma similar se pudieron determinar espacios propicios para la penetración de elementos florísticos tropicales y/o extratropicales. Tanto en los bordes del continente como también en dirección de las montañas centrales del Sahara penetran ambos elementos florísticos: el tropical y extratropical. Las regiones extremadamente secas occidentales y orientales del Sahara no han sido penetradas.

Clima y límites florísticos

Los límites areales de goe elementos similares guardan estrecha relación con las influencias climáticas del medio ambiente. El estudio muestra primero claramente que el límite tropical de la región seca del Sahara no está determinado, casi en absoluto, por condiciones hídricas. Sin embar-

go, sí guardan relación con las condicionantes térmicas. Todas las relaciones supuestas fueron chequeadas a través de un análisis estadístico de correlación.

Los siguientes valores térmicos han demostrado su efectividad fisiológica para los vegetales y se correlacionan con el primer límite florístico tropical dentro de una probabilidad de error de 1 a 5% (figura 6).

1. Límite absoluto de heladas.
2. La temperatura mínima media del mes más frío de 9,5°C.
3. La temperatura media anual de 24,5°C.
4. La temperatura media del mes más frío de 18°C.

El límite entre lluvias estivales e invernales tiene sólo una influencia directa en la limitación de la flora tropical anual. Estas formas de vida no son afectadas radicalmente por las temperaturas relativamente bajas de los meses invernales, ya que como terófitas estivales sobreviven esta época en la fase latente de la semilla.

Como los análisis estadísticos no permiten concluir acerca de las causales, se hace necesaria una interpretación ecofisiológica de los resultados obtenidos estadísticamente sobre las relaciones entre los valores térmicos y el primer límite florístico tropical. De esta forma, el límite absoluto de las heladas representa una línea a partir de la cual se pueden dar características térmicas

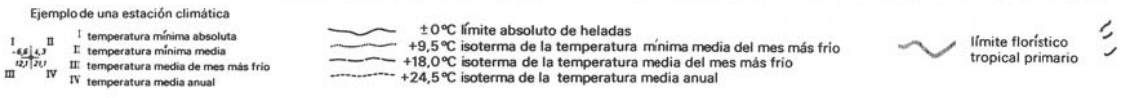
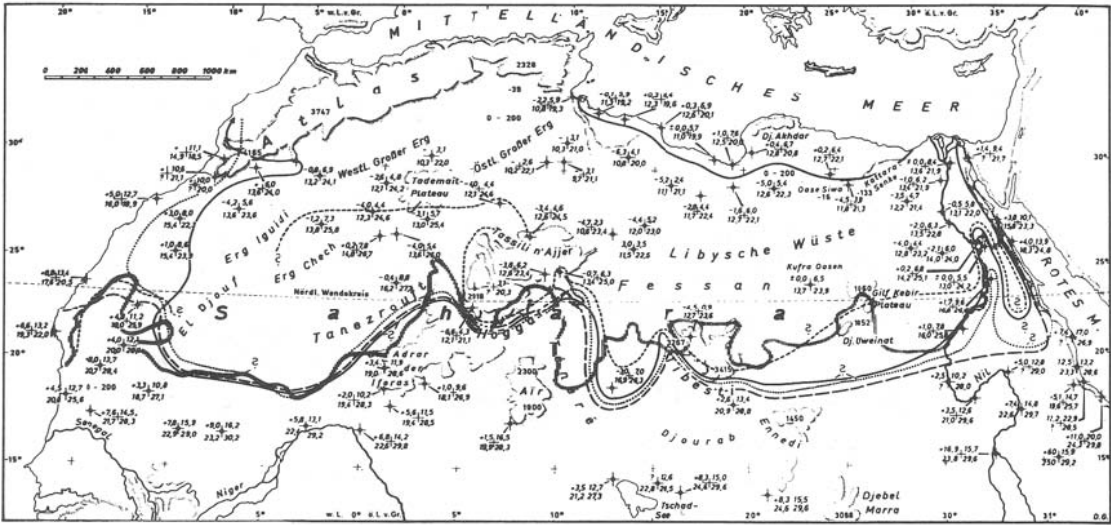


Figura 6: Parámetros térmicos y límite florístico tropical en el Sahara (sg. Lauer/Frankenberg 1977).

de larga duración y que pueden producir daños de enfriamiento en plantas susceptibles, después de dos horas bajo efectos de temperatura entre -2° y -5° . Casi todas las especies del geoelemento tropical están afectadas por ello, como por ejemplo *Acacia seyal*, que no puede sobrevivir a temperaturas de 0°C .

La temperatura mínima media del mes más frío de $9,5^{\circ}\text{C}$ muestra que existen a menudo temperaturas alrededor de 0°C , lo que puede significar una decisiva inhibición para la expansión de muchas especies tropicales. De la interpretación fisiológica de los parámetros obtenidos estadísticamente para el límite florístico tropical se pueden desprender los siguientes hechos :

1. El límite se ve afectado decisivamente por condiciones ambientales que revisten importancia durante la fase reproductiva de las plantas.
2. Temperaturas en torno a 0°C , o un déficit de calor limitan la expansión de los areales de casi todas las especies tropicales, así como también de la mayoría de las especies del geoelemento tropical-sahariano. Ellas no solamente determinan las fases vitales, sino que la producción de las plantas. En las especies tropicales disminuye la facultad de la depresión del punto de congelamiento que está determinado osmóticamente. Carecen de algún mecanismo de resistencia a las heladas.
3. Los efectos de las heladas influyen en todo el ancho y profundidad del Sahara las condiciones de vida del geoelemento tropical. En el ámbito sin heladas y oceánico de la costa

occidental y en sectores de la costa del Mar Mediterráneo revisten importancia las sumas térmicas, como condición para el desarrollo de abundantes y resistentes procesos vegetativos y de crecimiento. La temperatura media anual de $24,5^{\circ}\text{C}$ y la temperatura media del mes más frío de 18°C , representan condiciones límites que deben ser traspuestas en las plantas tropicales para que ellas puedan subsistir frente a la competencia de otras especies. Las plantas tropicales tienen un nivel térmico óptimo más alto para su desarrollo y crecimiento. El camino de la fotosíntesis es otro en estas plantas, como se ha podido descubrir últimamente.

Sin duda que en la limitación efectiva de los geoelementos tropicales son determinantes la acción conjunta de varios factores ambientales; rara vez es solamente uno el factor decisivo.

LA DINAMICA DE LAS MIGRACIONES FLO-
RISTICAS DEBIDO A CAMBIOS CLIMATICOS
DESDE EL PLEISTOCENO

La figura 7 muestra nuevamente el engranaje de los geoelementos tropicales y extratropicales -de acuerdo al estado actual- a través de un perfil ideal norte-sur a lo largo del Sahara.

Sin embargo, para comprender la totalidad de la dinámica y detectar el comportamiento activo o pasivo de los diversos geoelementos es necesario estudiar los procesos históricos del desarrollo del clima. Precisamente, a través de ellos se puede detectar cuán sensiblemente reaccionan las regiones problemas marginales del desierto del

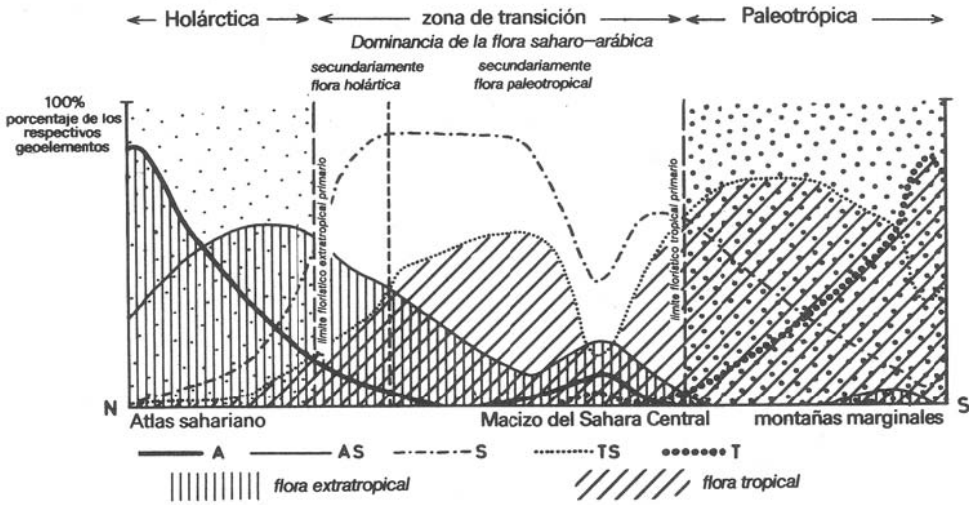


Figura 7: Proporción relativa de los geoelementos en un perfil norte-sur idealizado a través del Sahara (sg. Lauer/Frankenberg 1977).

Sahara frente a cambios climáticos y la influencia del hombre.

Es incuestionable que los cambios climáticos pleistocénicos y holocénicos trajeron como consecuencia amplios desplazamientos de las regiones florísticas. Podemos partir del supuesto que la composición de la flora en el centro del sector occidental del Sahara Central y del desierto de Libia permaneció casi constante durante el holoceno, ya que el clima hiperárido de estas regiones, prácticamente, no estuvo afectado por oscila-

ciones. Allí se localizan los núcleos de la flora endémica saharo-arábica, que también mostrará características muy constantes durante todo el pleistoceno.

Las oscilaciones de las regiones florísticas tuvieron, por consiguiente, una gran escala en las regiones marginales del Sahara, tanto en el norte como en el sur. Ello sucedió en los márgenes costeros cercanos al mar y en los verdaderos puentes húmedos que atraviesan el Sahara a lo largo de los macizos montañosos (figura 8).

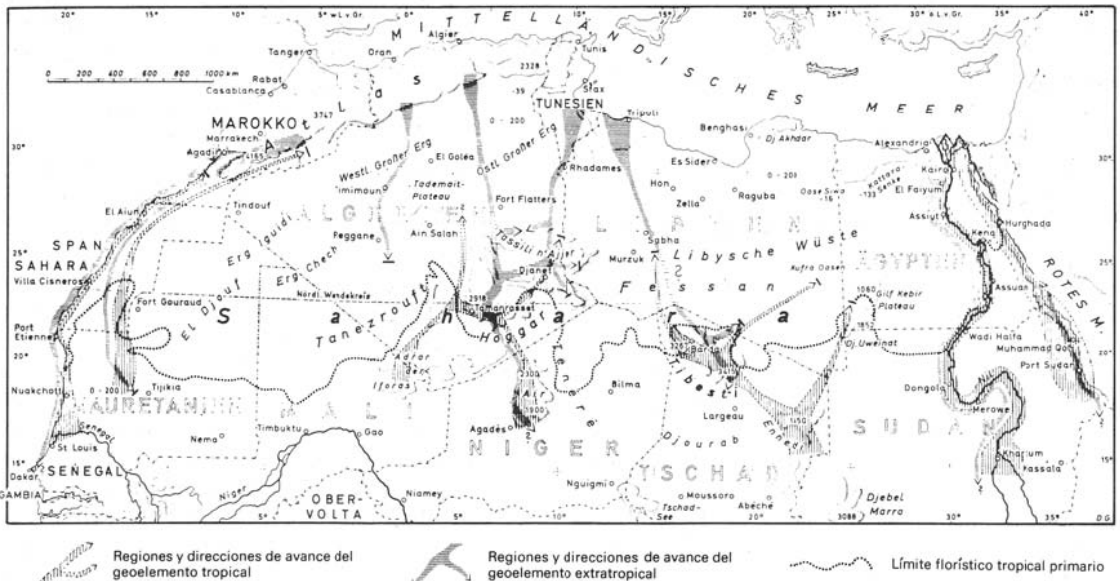


Figura 8: La dinámica de la flora en el Sahara (sg. Lauer/Frankenberg 1977).
 1. Regiones y direcciones de avance del geoelemento tropical.
 2. Regiones y direcciones de avance del geoelemento extratropical.
 3. Límite florístico tropical primario.

Tres mapas clarifican esta dinámica (figuras 9-12). Durante el máximo de la última glaciación -aprox. 18.000 años A.C. y período en que la temperatura descendió por lo menos entre 6 y 8°C- la zona subtropical con lluvias invernales había irrumpido bastante en la región desértica, aunque con montos de precipitación reducidos.

Este desplazamiento adquirió casi las dimensiones de toda una zona climática. De manera similar, el clima seco sahariano había avanzado por lo menos hasta el margen meridional de la actual zona del Sahel. El límite tropical de la flora y, con ello, el límite de los trópicos cálidos, libres de heladas, corría bastante al sur (figura 9).

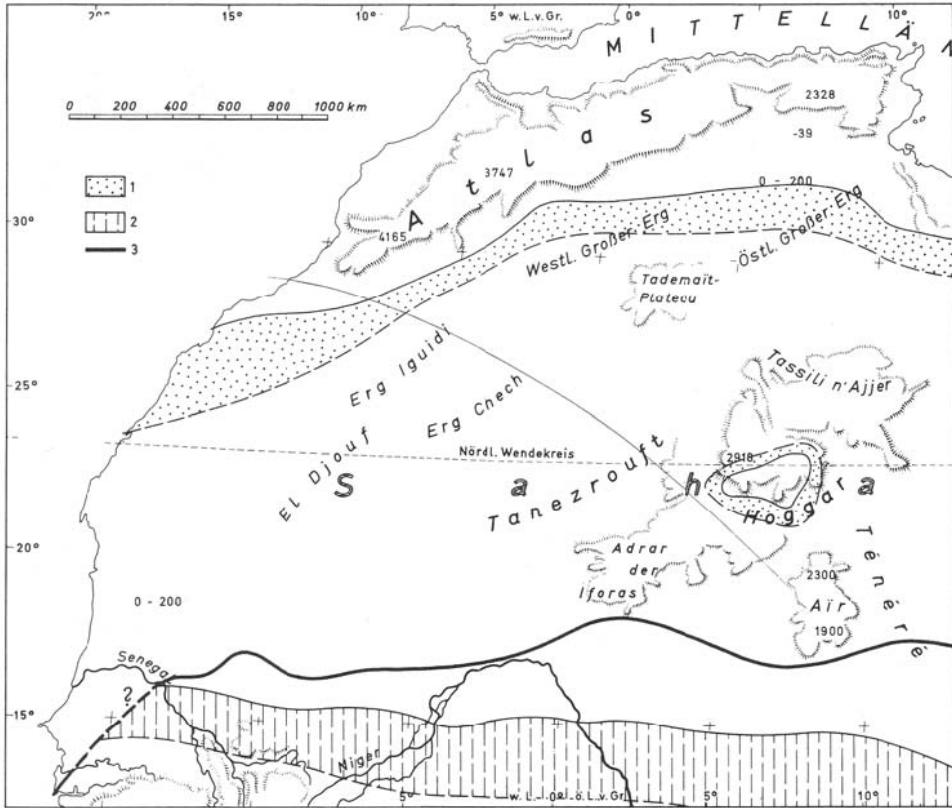


Figura 9: Límites florísticos alrededor de 18.000 B. P. en el Sahara occidental (sg. Lauer/Frankenberg 1979).

1. Borde limítrofe septentrional del Sahara.
2. Borde limítrofe meridional del Sahara.
3. Límite florístico tropical primario.

Durante el período del óptimo climático holocénico -cerca de 5.500 A.C.- la configuración espacial de las zonas climáticas era similar a la actual, ya que el aumento térmico medio fue de solamente 2°C en comparación con hoy en día. Sin embargo, este nivel térmico más elevado dio lugar a una mayor disponibilidad de vapor de agua y con ello mayores montos de precipitación en promedio. De esta forma, las zonas climáticas frías y extremadamente secas fueron constreñidas. Esto trajo como consecuencia que el elemento florístico tropical irrumpiera bastante hacia el norte, mientras que el elemento sahariano y subtropical debió ceder areales (figura 10).

El elemento florístico tropical retrocedió hasta su actual límite como consecuencia de una tendencia suave al enfriamiento y sequía del clima del Sahara (figura 11).

Desde el punto de vista espacial se evidencian claras diferencias entre el margen norte y sur del Sahara dentro de las diversas fases de cambios climáticos. El norte del Sahara estuvo caracterizado desde 18.000 A.e. hasta alrededor de 4.500 A.C. por condiciones algo más húmedas en comparación con la actualidad. La corriente en "chorro" (jet Stream) corría en medio del Sahara. El clima mediterráneo dominaba en grandes sectores del Sahara central y septentrional. El alisio cons-

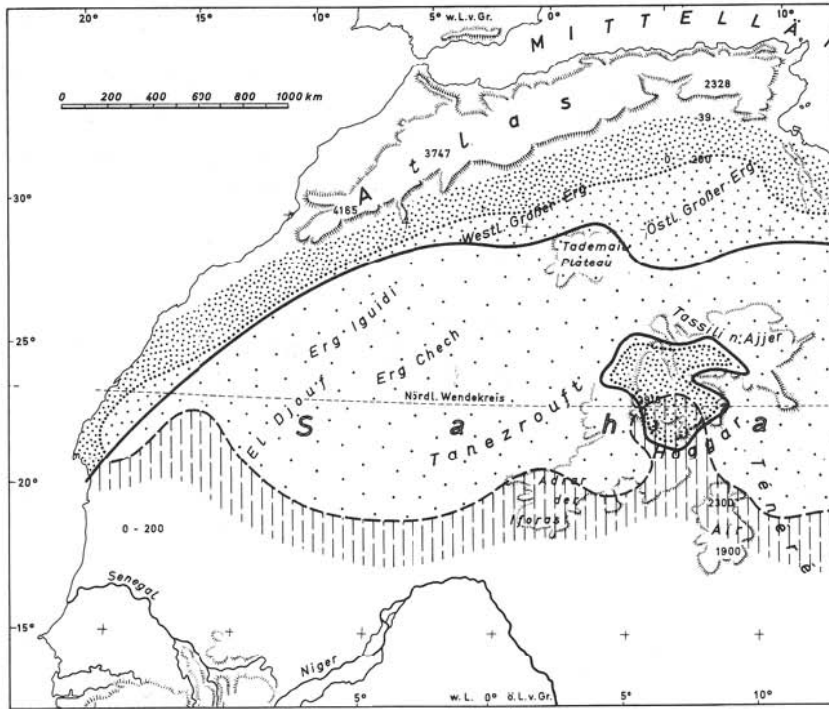


Figura 10: Los límites florísticos alrededor de 5.500 B.P. en el Sahara occidental (sg. Lauer/Frankenberg 1979). (Leyenda, véase figura 11).

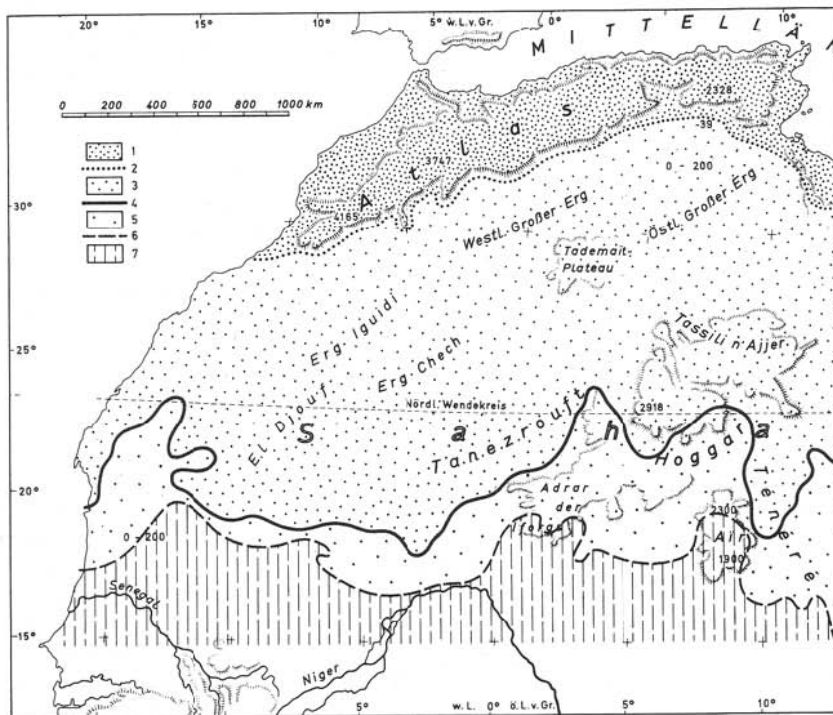


Figura 11: Límites florísticos actuales en el Sahara occidental (sg. Lauer/Frankenberg 1979).

- | | |
|--|---|
| 1. Región florística extratropical. | 5. Región florística tropical-sahariana. |
| 2. Límite florístico septentrional del Sahara. | 6. Límite florístico meridional del Sahara. |
| 3. Región florística saharo-arábica. | 7. Región florística tropical. |
| 4. Límite florístico primario tropical. | |

treñía la zona húmeda ecuatorial (figura 12). Por consiguiente, podemos suponer que en estas regiones las variaciones térmicas son las que han desempeñado el rol ecológico fundamental en el cambio de la cubierta vegetal. Durante fases frías y húmedas se expandía una flora estepárica mediterránea profundamente hacia el sur, con *Stipa* como especie dominante. En fases cálidas húmedas los areales de especies tropicales, como por ejemplo *Acacia*, alcanzaban hasta el borde meridional de las montañas Atlas.

Por el contrario, el margen sur de la región de investigación estuvo caracterizado desde 18.000 A.C. por extremas oscilaciones de humedad y de calor. Allí se alternaban condiciones hiperáridas y frías con características más húmedas y frías, así como condiciones más húmedas y cálidas. Generalmente, las fases cálidas fueron también fases húmedas. La región del Sahara-Sahel está caracterizada, desde el punto de vista ecológico, por una fragilidad extrema frente a oscilaciones climáticas, ya que tanto las fluctuaciones térmicas como las hídricas tienen influencias decisivas sobre la composición del mundo vegetal. Las especies tropicales hacia el sur rechazan tanto un descenso térmico como una sequía. Es por este motivo que la desertificación es más visible desde hace más o menos 4.500 años A.C. en el sur que en el límite septentrional de la gran zona desértica africana.

La figura 13 muestra que la zona de Sahel sufre grandes fluctuaciones en sus condiciones

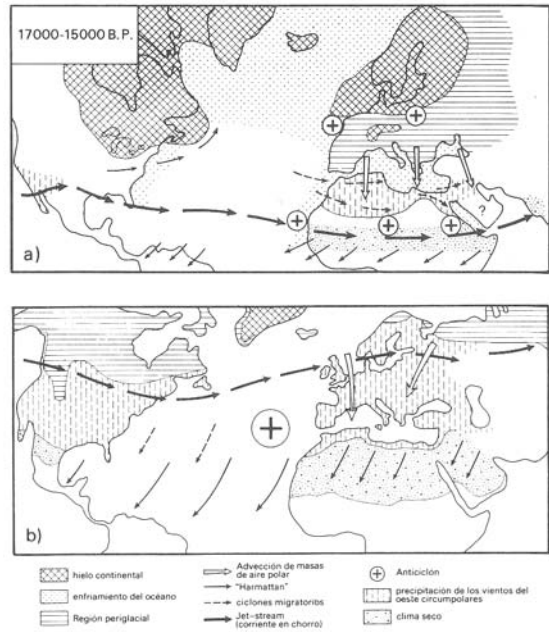


Figura 2: Circulación atmosférica alrededor de 17.000 H.P. (sg. Rognon 1976) y en la actualidad.

ambientales ecológicas, dentro de las cuales resultan decisivas, tanto los factores térmicos como también los hídricos. Las especies tropicales migran hacia el norte solamente bajo condiciones cálidas y húmedas. Por el contrario, pareciera que las fluctuaciones térmicas fuesen más relevantes para composición del mundo vegetal en el mar-

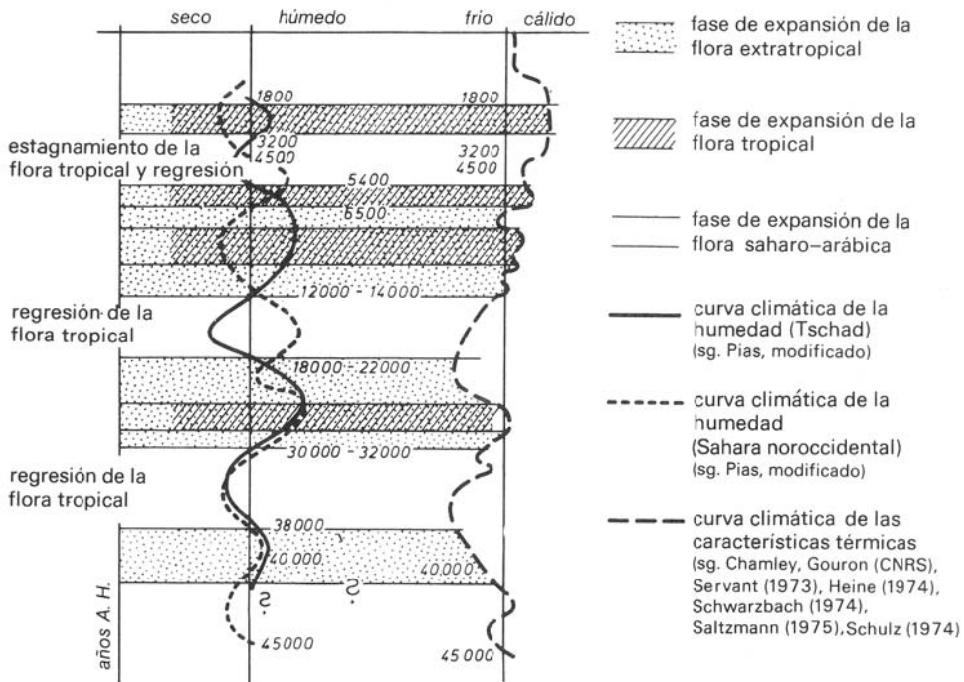


Figura 3: Oscilación climática y cambios florísticos en el Sahara (sg. Lauer/Frankenberg 1977).

gen septentrional del Sahara, ya que las montañas Atlas no dan lugar a grandes fluctuaciones hídricas. Las plantas holárticas expanden sus areales hacia el sur, tanto bajo condiciones frías como cálidas y húmedas. Ellas son más agresivas.

CONCLUSION

Como resumen, se puede decir que el geoelemento extratropical de la región del Sahara aprovecha rápidas oscilaciones del clima para avanzar, pudiendo ser caracterizado como un elemento progresivo. A la inversa, la flora tropical se comporta en las regiones secas del Sahara como un elemento estático a regresivo. Esta avanza levemente o se afianza en su lugar, en las épocas más cálidas y húmedas que le son favorables, aunque de corta duración. Durante épocas más frías es infiltrada o rechazada por elementos extratropicales y en los lugares más secos por elementos saharo-arábicos. El geoelemento saharo-arábico, xerofítico, reacciona casi exclusiva-

mente frente a condiciones climáticas hídricas y, por consiguiente, expande su areal preferentemente durante épocas climáticas áridas. Este geoelemento permite suponer la existencia de fases regresivas durante climas más húmedos y también cuando se ve favorecido el geoelemento extratropical debido a temperaturas más frías.

BIBLIOGRAFIA

- LAUER, W. 1975. "Vorn Wesen der Trepen". Abh.d. Akad. d. Wissu.d.Lit.Mainz. Math. nato Kl. NO 3. Wiesbaden (Edil. Steiner).
- LAUER, W. y FRANKENBERG, P. 1977. "Zum Problem der Tropengrenze in der Sahara". ERDKUNDE 31, p. 1-15, Bonn.
- FRANKENBERG, P. 1978. "Florengeographische Untersuchungen im Rahmen der Sahara". Bonner Geogr. Abh, 58 Bonn.
- LAUER, W. y FRANKENBERG, P. 1979. "Zur Klima- und Vegetationsgeschichte der westlichen Sahara", Abh. d. Akad. d. Wiss. u.d. Lit. Math-nat. Kl. NO 1. Wiesbaden (Editorial F. Steiner).