

ANALOGIAS AGROCLIMATICAS UTILES PARA LA ADAPTACION SOCIAL AL CAMBIO CLIMATICO GLOBAL DE AMERICA DEL SUR

Juan Jacinto Burgos.
Universidad Nacional de Buenos Aires
Ingeniero Agrónomo. Centro de Investigaciones Biometeorológicas, CONICET.

I. Introducción

Los cambios climáticos globales de la Tierra que predicen, para un futuro próximo, algunos importantes centros de investigación de la atmósfera en diferentes países, ha producido una repercusión notable en los ámbitos de las actividades económicas y ecológicas mundiales. Como causa originaria de estos profundos cambios se ha reconocido el consumo de una población humana creciente en número y en demanda individual de bienes y servicios. De esta expansión deriva la alta contaminación atmosférica, con gases y aerosoles que han aumentado, y aumentarán más en las próximas décadas, el efecto invernadero que la atmósfera ejercía sobre la Tierra hace un siglo.

Los recursos naturales renovables de la Tierra como vegetación natural, el agua continental y los suelos, se verán afectados por los cambios previstos porque la perturbación inducida en una intensidad y tiempo, no tiene parangón con otras experimentadas por el hombre en siglos y milenios pasados. Además, la agricultura y ganadería actuales, que en gran parte dependen de los recursos mencionados en primer término, deberán consecuentemente sufrir una gran transformación.

En el presente estudio se analizará la perspectiva del cambio regional del clima en América del Sur y la autenticidad e incertidumbre de los elementos que predicen los modelos numéricos y analógicos de cambio disponibles. Al mismo tiempo, sin desconocer la conveniencia de estu-

diar y proponer modelos numéricos más precisos, tanto de la productividad futura de los Ecosistemas naturales como de los Agrosistemas generados por el hombre, se discute la utilidad de aplicar algunas analogías disponibles de más rápido acceso, que pueden indicar la tendencia de las modificaciones que podrían sufrir los recursos naturales renovables y la de la transformación o desplazamientos de los Agrosistemas actuales.

Este tipo de análisis puede ser útil en la planificación del uso de la tierra si se tiene en cuenta el cambio en escala continental; pero en la escala subregional o local, puede ayudar en la adaptación social hacia los nuevos sistemas agrícolas y ganaderos, compatibles con climas futuros.

II. Autenticidad e incertidumbre de los elementos climáticos que predicen los modelos numéricos, para simular el cambio global del clima de América del Sur

Desde hace más de dos décadas de los estudios precursores de Manabe y Strickler (1964), Manabe y Wetherald (1967), Budyko (1969) y Sellers (1969), varias decenas de trabajos han demostrado, y muchos de ellos tratado de evaluar, el aumento de la temperatura global de la Tierra, que puede ocasionar un incremento del doble de la cantidad de CO₂ de la atmósfera, así como el de otros gases de efecto invernadero, como consecuencia de la actividad humana. Esta larga serie de trabajos abarca desde modelos semiempíricos basados en el cambio que induce este in-

cremento en el balance de energía de superficie, a modelos numéricos más complejos, que incluyen parámetros de cambio en la estabilidad de la atmósfera y en la circulación general del sistema interactivo atmósfera-océano. Todos estos modelos predicen un aumento notable de la temperatura, variable según cada modelo, pero son más variables aun en la predicción del cambio que ocurrirá en las precipitaciones.

a) Modelos numéricos de la circulación general de la atmósfera

Los modelos numéricos de la circulación general de la atmósfera generados en la última década, se basan en un análisis tridimensional termodinámico de la atmósfera y de la capa superficial del océano en intercambio con ella. Los resultados de los mismos sólo se han podido verificar con los valores de temperatura de la superficie terrestre de los últimos 100 años, que es el único período pasado del que se poseen registros confiables. Entre estos modelos cabe mencionar a los denominados:

— NCAR, National Center of Atmospheric Research, Colorado (USA), Washington y Meehl (1983)

— GFDL, Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, Princeton University (USA), Manabe y Wetherald (1987).

— GISS, Goddard Institute of Space Studies, New York (USA), Hansen et al. (1984 y 1988a)

— OSU, Oregon State University, Oregon (USA), Schlesinger (1986).

— BMO, British Meteorological Office, London (UK), Mitchell (1983) y Mitchell et al. (1987)

— BMRC, Bureau of Meteorology Research Center, Melbourne, Australia, Hart (1989).

Estos últimos modelos, como se comentó en un trabajo anterior (Burgos et al., inédito), si bien coinciden en pronosticar un aumento de la temperatura y de la precipitación global de la Tierra, destacan discrepancias cuando se comparan los cambios previstos en escala regional o local y en

cortos períodos de tiempo (valores anuales, estacionales y mensuales). Además, las diferencias son mayores y hasta contradictorias cuando la comparación se hace sobre los elementos predichos, a medida que éstos se alejan del factor forzante original (balance de radiación), como pueden ser la circulación general, la precipitación y la humedad del suelo.

Varios autores han tratado de comparar los resultados que se pueden obtener con estos modelos. Unos, como Schlesinger y Mitchell (1987), analizando la estructura de los mismos y otros (Grotch, 1988), haciendo una comparación estadística sobre las diferencias entre los mismos. De esta comparación se puede sacar una conclusión, que los modelos NCAR y GISS, son los que predicen los cambios más notables y que, al mismo tiempo, dan los errores de cambio global de temperatura y precipitación con menor error sobre la serie de 100 años de registros disponibles.

Por esta razón es que los interesados en estudiar los efectos del cambio global del clima sobre la biosfera, actualmente se orientan con ellos para adecuar la respuesta socioeconómica al mismo.

Las diferencias globales, regionales, locales y en distintos períodos de tiempo, que se pueden notar entre los diferentes modelos de simulación del cambio climático, es posible que se deban a la estructura física de cada modelo, pero además a aspectos aún no suficientemente conocidos como retroefectos de la nubosidad y de la dinámica oceánica, consecuencia de la geometría del modelo (2-11 niveles de análisis atmosféricos, niveles de profundidad oceánica, resolución vertical y horizontal de las unidades de retículo suavización del relieve, etc.). También debe señalarse que la dinámica de la cubierta vegetal, factor de cambio tan importante para América del Sur, no se ha tomado en cuenta en la mayoría de los modelos. Sin embargo, puede mencionarse que la contribución de Dickinson y Henderson-Sellers (1988), tiende a salvar esa omisión al

introducir este factor en el modelo NCAR, concepto éste que en el futuro se irá perfeccionando.

El progreso que seguramente se obtendrá en los próximos años, para esclarecer estas incertidumbres, proveerá un instrumento indispensable para planificar la adaptación social en el futuro, con mayor seguridad que en el presente.

b) Modelos analógicos del cambio global y regional del clima y predicción cualitativa de sus elementos.

Existen también algunas tentativas de predecir el cambio futuro del clima, como consecuencia del aumento del efecto invernadero de la atmósfera, realizadas sobre la base de analogías sobre cambios ya ocurridos en el pasado, pero teniendo en cuenta el conocimiento que actualmente se posee del sistema climático. Pueden mencionarse así el modelo del balance de agua continental de la Tierra de Kellog y Schwarc (1982), que considerando los cambios ocurridos en el período altitérico, de «óptimo climático» del Holoceno, y el de más altas temperaturas de este siglo, deduce las áreas que resultarían más secas o más húmedas de la Tierra si ocurriera un aumento global de la temperatura. En escala regional se puede mencionar las predicciones de cambio de la temperatura y precipitación en Australia con el aumento del efecto invernadero ($2 \times \text{CO}_2 \cong$ año 2030), realizadas por Pittock y Salinger, (1982) y Pittock, (1983). En un trabajo anterior (Burgos et al., inédito), en la reunión del IGBP en Swazilandia (1988), tuvimos ocasión de presentar la «hipótesis Molión» sobre los cambios climáticos cualitativos de temperatura y precipitación que podrían ocurrir en América del Sur, con un aumento del efecto invernadero equivalente a $2 \times \text{CO}_2 \cong$ año 2050. En este caso se analizaron los cambios posibles en la circulación regional de América del Sur y sus consecuencias sobre la temperatura de superficie, de la troposfera alta y la precipitación, con dos alternativas: si la selva amazónica se conservara como se encuentra en la actualidad, o si fuera inducida a la forma de sabana tropical por la acción del hombre.

III. El uso de la tierra frente al cambio global del clima

Sin duda, un gran cambio global del clima, en pocas décadas más adelante del tiempo actual, representará profundas transformaciones en el uso de la tierra y sus recursos naturales; sobre todo, si se tiene en cuenta el aumento que al mismo tiempo ocurrirá, tanto en la población humana como en sus exigencias de mayor consumo de bienes y servicios.

Sin embargo, prever la magnitud de las transformaciones que se producirán en la productividad natural y artificial de la tierra tiene una complejidad análoga, o mayor, a la de predecir la magnitud de los cambios de los elementos climáticos que la generan y que, someramente, se ha señalado en el capítulo anterior.

No obstante, algunas analogías bio y agroclimáticas pueden ser útiles para la planificación de estrategias de adaptación social a los cambios climáticos, cuyas tendencias, a pesar de sus discrepancias insinúan los modelos de circulación general y regional de la atmósfera que se han comentado. Los diferentes niveles de información necesaria para cumplir con este objetivo deberán variar, en escalas de espacio y tiempo, como para satisfacer desde los intereses más generales a los más específicos y concretos.

a) Los grandes Biomas de América del Sur y los parámetros fitoclimáticos que los determinan

Los grandes Biomas de la Tierra se componen de un conjunto de ecosistemas que funcionan en forma interrelacionada y que se definen por su vegetación dominante o climática. El intercambio de la vegetación con el material madre del suelo y el clima, forman el suelo; y la fauna espontánea resulta de la productividad primaria (vegetación) o secundaria (otras especies animales), que suministra el bioma en equilibrio. La definición de los grandes Biomas por el tipo de vegetación dominante, se justifica por cuanto de éste dependen las otras formas de vida que en él cohabitan.

Consecuentemente, si el tipo de vegetación puede ser determinado con ciertos parámetros climáticos, éstos a su vez serán, en gran parte, los que determinen el tipo de suelo y de asociación faunística que comparte el hábitat. Sin embargo, sólo algunos Biomas naturales son exclusiva predominantemente climatogénicos como la selva higrófila o el desierto, en los cuales predomina el intercambio vertical de masa y energía. Pueden existir otros en los que el intercambio horizontal es predominante y del que resultan formas que no están en equilibrio con el clima local, como la Selva en galería y, a veces, el Parque y la Sabana.

Estos Biomas cubren grandes extensiones de la Tierra y no tienen entre sí límites abruptos, sino que se van transformando en otros paulatinamente, formando bordes o límites de amplitud variable o «ecotonos» en los que el clima ya no es el típico equilibrio con el Bioma. En los siglos que forman el Holoceno (10-8.000 últimos años), los cambios climáticos no han sido tan intensos como los registrados en épocas más antiguas de la Tierra, de modo que los grandes Biomas actuales no han cubierto extensiones muy diferentes que las presentes y se puede considerar que los mismos, en escala de tiempo, pueden tener de varios siglos o varios milenios (Clark, 1985). Se puede afirmar así que en los últimos 100 años, o período instrumental, en el que la temperatura global de la Tierra ha aumentado poco más de 0,5 °C, los cambios experimentados en la cubierta vegetal se han debido más a la presión antropogénica que a cambios climáticos. Por esta razón, los parámetros fitoclimáticos que se pueden ajustar con observaciones de los últimos 100 años, para los mayores Biomas de la Tierra actuales, deben incluir los correspondientes al equilibrio entre la vegetación y el clima pasado, así como los valores extremos que marcan la transición entre Biomas en sucesión.

Muchos autores se han ocupado de hallar, por inferencia analógica, los factores climáticos que determinan los mayores Biomas de la Tierra. De esta forma se han establecido modelos bi y trifactoriales, que han intentado fijar los límites en-

tre los diferentes Biomas terrestres. Algunos de estos modelos se han usado para determinar la productividad primaria de los Biomas, así como el cambio de productividad y desplazamiento que sufrirán como consecuencia del incremento de temperatura, debido a la duplicación del efecto invernáculo de la atmósfera.

Entre estos últimos trabajos se pueden mencionar los de Emanuel et al. (1984), Shugart et al. (1986) y Kauppi y Posch (1987), que cuando refieren algún modelo fotoclimático lo hacen generalmente al de Holdridge (1947).

La mayoría de los modelos bifactoriales relaciona la temperatura media anual y la precipitación total anual, como son, entre otros, los siguientes. Lang (1915), Köppen (1923 y 1931), de Martonne (1926), Crowther (1930), Wang (1941), Mohro y van Baren (1954), Gaussen (1954), Walter y Lieth (1961) y Whittaker (1970). Otros modelos binarios consideran elementos diferentes como la evaporación o la evapotranspiración y la precipitación: Thornthwaite (1931) y Thornthwaite y Hare (1955); el balance de radiación y unidades energéticas del balance de radiación y precipitación: Budyko (1956 y 1971); la precipitación y el déficit del vapor de agua en la atmósfera: Prescott (1931). Como modelos trifactoriales pueden mencionarse el de Holdridge (1947), que combina la temperatura media anual, la precipitación total anual y la relación entre la evapotranspiración potencial anual y la precipitación anual; Burgos (1959 y 1986), que usa la evotranspiración real y el exceso y la deficiencia totales anuales y Litinsky (1983), que emplea temperatura y precipitación medias anuales y un índice de continentalidad, si bien este modelo no se ha intentado relacionar con la vegetación natural.

Aunque no son muchas las verificaciones que se han realizado de estos modelos con la distribución real de la vegetación mundial, se puede mencionar una evaluación de la autenticidad de los parámetros usados en los mismos. Burgos y Maronna (inédito), aplicando un análisis discriminante no paramétrico (Breiman et al. 1979),

sobre 2.083 estaciones de América del Sur, África y Australia, distribuidas en once grandes Biomas de la Tierra. Este análisis mostró el menor error total del modelo trifactorial basado en la evapotranspiración real, exceso y deficiencia de agua anuales. Sin embargo, este método no discriminó errores que pudieran surgir del efecto de otros factores, que en algunos casos pudieran ser más importantes que el clima para determinar la vegetación (suelo), deficiencias en la delimitación cartográfica de los Biomas, ni los errores que pueden surgir al fusionar 70-80 o más tipos de vegetación diferentes en 11 jerarquías principales.

El desplazamiento de los límites que se fijaron para estos 11 tipos de vegetación, según el cambio de la temperatura y la precipitación, en el futuro puede dar una idea de la transformación que sufrirán estos tipos de vegetación con un efecto de $2 \times \text{CO}_2$. Así, en un trabajo anterior (Burgos, 1982), se mostraron las regiones con clima en desequilibrio potencial de la Gran Selva Amazónica, como aquellas con una Evapotranspiración Real anual < 1.200 mm en el SE de esa cuenca en Brasil; con un Exceso de Agua anual < 500 mm en el Este y Centro del Sur de Brasil y en el Centro Norte de Brasil, Guyana y Venezuela y una Deficiencia de Agua anual > 100 mm en la cuenca baja Central del Amazonas en Brasil y en el Sudeste de la misma. Debe preocuparnos cómo avanzarán estos límites sobre la actual Selva en equilibrio, si como consecuencia del aumento $2 \times \text{CO}_2$ las temperaturas aumentaran de 3 a 4 °C y el Índice de Sequía (sobre la base del Palmer Dry Index), indicara una intensidad más grave que la registrada con una probabilidad menor del 1 % en los años pasados. (Hansen et al., 1988 b).

Por otra parte, si la precipitación disminuyera un 30 % como consecuencia de la deforestación, como predicen Dickinson et al. (1986) y Dickinson y Henderson Sellers (1988), en casi toda la cuenca se establecerá un clima en equilibrio con la Sabana Tropical. De modo análogo, la extensa formación Pampa que comparten actualmente Argentina, Uruguay y Sur de Brasil, tenderá

en gran parte a tener un clima más subtropical por el desplazamiento de sus límites de Evapotranspiración Real anual > 700 mm; Exceso de Agua anual < 300 mm y Deficiencia de Agua anual > 300 .

b) Los sistemas mayores de producción y el cambio global del clima

Los sistemas mayores de producción de América del Sur fueron analizados en un trabajo anterior (Burgos, 1975). Para ello se utilizaron algunos parámetros bioclimáticos y agroclimáticos en macroescala, que permitieron su delimitación. Los mayores sistemas de delimitación reconocidos fueron: Forestal, Agrícola, Ganadero e Industrial.

1. *Producción Forestal.* La producción forestal se ha definido por la energía disponible que se puede evaluar como el balance de radiación, cuyo límite mínimo para la vegetación arbórea se puede fijar por la distribución actual de los bosques naturales en 36 a 40 W/m². Como la evotranspiración potencial puede ser una medida indirecta de esa energía, el límite mínimo del bosque natural o cultivado se encuentra, aproximadamente, entre los valores de Evapotranspiración Potencial de 450-500 mm anuales. Con valores superiores a este límite energético, sólo es posible el bosque higrófito espontáneo si la Evapotranspiración Real supera los 450-500 mm y el Exceso de Agua anual es mayor que 300 mm. Cuando el Exceso de Agua es menor que 300 mm, es posible sólo el bosque xerófito o el bosque higrófito con riego.

El límite energético para el desarrollo arbóreo en América del Sur se encuentra en altos niveles de los Andes y otros accidentes orográficos importantes, por lo que el futuro calentamiento de la Tierra significará ampliar, hacia altitudes menores, estos límites. Los cambios o desplazamientos de los otros factores que se han mencionado, significarán asimismo una transformación de productividad forestal de las regiones más bajas del continente. Por ello, un mejor conocimiento de lo que ocurrirá con la precipitación

permitirá crear el escenario futuro de este tipo de producción.

2. *Producción Agrícola.* La producción agrícola se puede limitar en macroescala con algunos parámetros agroclimáticos, que pueden definir los mayores sistemas agrícolas. Así, muchos agroclimáticos, han mencionado el período libre de heladas de 150 días, como el período mínimo compatible entre la agricultura de desarrollo y la de subsistencia. Sin embargo, es cierto también que el cultivo del trigo se practica en regiones de la URSS y Canadá, donde el período libre de heladas es de 100-90 días. Pero debe reconocerse que en estos países, por la gran amplitud de variación anual de la temperatura, las fechas medias de primera y última helada son muy fijas y su desviación típica es de pocos días. En cambio, en América del Sur el límite de 150 días libres de heladas es más apropiado por la gran variabilidad de las fechas medias, debido a la menor amplitud anual de la temperatura, tanto en el extremo sur del continente, como en ciertas altitudes orográficas.

En las regiones con más de 150 días libres de heladas, el límite entre la agricultura con riego y de secano se puede aproximar con el valor de 7 meses consecutivos con deficiencia de agua, o con valores ≥ 200 mm de Deficiencia de Agua anual.

Dentro de estos amplios dos criterios enunciados, es posible aún indicar mediante la experiencia de los últimos siglos de agricultura en el continente y las observaciones climatológicas que se poseen del período instrumental (~ 100 años) algunos parámetros agroclimáticos que pueden limitar, en forma aproximada, los distintos tipos de agricultura de tipo templado, subtropical y tropical.

Así, el valor de temperatura media del mes más frío 12°C , puede ser el límite entre la agricultura de clima templado y subtropical; la temperatura mínima absoluta anual de -12°C ($P = 5\%$), el límite de la agricultura subtropical de cosecha estival (datilero, té, etc.); la temperatura

mínima absoluta anual -5°C ($P = 20\%$), el límite de la agricultura subtropical de cosecha de maduración invernal (caña de azúcar, citrus); la temperatura mínima absoluta anual $-1,5^{\circ}\text{C}$ ($P = 5\%$), agricultura tropical con tolerancia al frío (café, ananá) y temperatura mínima absoluta anual 6°C ($P = 20\%$), agricultura tropical sin tolerancia al frío (cacao, pimienta).

3. *Producción Ganadera.* Los límites de la producción ganadera en macroescala se pueden establecer con parámetros bioclimáticos que consideren en primer lugar la influencia directa del clima en el bienestar animal y, en segundo lugar, la indirecta sobre la productividad primaria para su alimentación.

La producción animal, en su mayor parte, la constituye la cría y el mejoramiento de especies animales homeotérmicas, es decir, con temperatura del cuerpo constante o casi constante. Tales son los vacunos, ovinos, caprinos, suinos, equinos, camélidos, etc. Este tipo fisiológico animal tiene la particularidad de que exige un nivel de temperatura óptimo, en el cual el organismo produce el consumo mínimo de calor para mantener su temperatura corporal. Por debajo o por encima de ese nivel, que se denomina de termoneutralidad, el animal se ve obligado a producir calor adicional para poder mantener su temperatura y ello limita su bienestar y producción. Casi todas las especies domésticas, como los vacunos europeos (*Bos taurus*), ovinos, equinos, y suinos, tienen el nivel de neutralidad próximo a los $21 - 22^{\circ}\text{C}$. Las razas de vacunas hindúes (*Bos indicus*), en cambio, tienen el nivel de termoneutralidad unos $7 - 10^{\circ}\text{C}$ más alto que los vacunos europeos, por lo cual se adaptan mejor a los climas tropicales.

Por la razón expuesta anteriormente, en latitudes intertropicales donde la amplitud anual es pequeña, los 22°C de temperatura media anual puede ser el límite entre la ganadería tropical y de clima templado. En cambio, en latitudes subtropicales es más apropiado establecer este límite con la temperatura media del mes más cálido de 26°C . En latitudes medias, la ganadería de

clima templado sin estabulación por frío, requerirá, además del mes más cálido con temperatura $< 26^{\circ}\text{C}$, una temperatura del mes más frío superior a 5°C ; y con estabulación por frío, cuando esta temperatura sea inferior a 5°C .

La influencia indirecta del clima sobre la ganadería, por la productividad primaria que genera, se puede evaluar con parámetros en macroescala derivados del balance de agua. En este sentido es necesario determinar el tipo de vegetación natural, para lo cual resultarán útiles parámetros de los modelos fitoclimáticos de los grandes biomas, que se analizaron anteriormente.

Además convendrá determinar la estacionalidad del pastoreo y la necesidad de disponer de alimentación suplementaria. Ello se puede obtener de los valores de deficiencia mensual de agua. Del mismo modo que la necesidad de complementar la alimentación con calcio y fósforo, se puede obtener a partir de índices de lixiviación de suelos, como la magnitud anual del Exceso de Agua.

4. *Producción Industrial.* Las condiciones climáticas vinculadas con la producción industrial se relacionan con las de producción forestal y agrícola, pues la población humana que requiere la industria debe tener acceso fácil a aquellas producciones para su estabilidad social. Difícilmente podría estabilizarse una población industrial en un clima desértico. Además, la industria requiere energía y no hay duda que la energía hidroeléctrica que genera el clima es, hasta el presente, la más económica y más limpia.

Por esta razón, los parámetros que pueden delimitar la producción industrial se dividen en aquellos que evalúan la aptitud para el trabajo físico e intelectual del hombre y los que, de alguna manera, pueden expresar la magnitud de la energía industrial disponible. La temperatura del aire óptima para el trabajo intelectual del hombre es 18°C , aún cuando los esquimales tienen un nivel de termoneutralidad más bajo y el habitante del trópico, más alto.

De este modo, las regiones con menos de 150 días libres de heladas y temperatura del mes más cálido < 10 a 15°C , resultan «climas no agrícolas depresivos» para la mayoría de los hombres, es decir climas sin aptitud industrial. Los climas agrícolas y forestales, con más de 150 días libres de heladas son «estimulantes y óptimos» para el desarrollo industrial, si la temperatura del mes más cálido se encuentra entre 15 y 18°C . Entre 18 y 21°C , se ubican los «climas sedantes», subóptimo para la actividad industrial. Cuando el mes más cálido tiene la temperatura media superior a 21°C , puede ocurrir que el mes más frío sea $< 21^{\circ}\text{C}$, con lo cual el clima resulta excitante y sólo es medio apto para la actividad industrial; o bien que en el mes más frío la temperatura media sea $> 21^{\circ}\text{C}$, lo que produce un clima «enervante» o inadecuado para esta actividad.

Con respecto a la energía hidroeléctrica potencial, se considera aconsejable dividirla por cuencas hidrográficas y tener en cuenta el exceso de agua local y la altitud del punto y el valor resultante, expresado en kilográmetros, permite dividir las cuencas en jerarquías de energía potencial. Este criterio puede complementar el resultado de los parámetros bioclimático y facilitar una idea de la diferente aptitud, que puede tener una región para el desarrollo industrial.

IV. Consideraciones finales

Los parámetros agroclimáticos y bioclimáticos que se han analizado hasta aquí, que corresponden a la experiencia de los últimos siglos y el clima de los últimos 100 años, período durante el que la Tierra experimentó un relativamente pequeño calentamiento, se pueden aceptar como correspondientes a una situación de equilibrio entre el clima y los mayores sistemas de producción.

Si se tienen en cuenta las incertidumbres que aún subsisten, sobre todo, en los cambios que experimentarán la precipitación y la humedad del suelo, las analogías presentadas aquí pueden ser útiles para tener una primera visión de las trans-

formaciones que la producción y el uso de la tierra sufrirán a causa de los cambios, particularmente de la temperatura.

En el Cono Sur de América del Sur, se ha intentado analizar la magnitud de estas transformaciones, siguiendo los cambios de temperatura previsto por el modelo GISS. Para los cambios de precipitación se ha tenido en cuenta, además, las diferencias en magnitud y régimen de las precipitaciones, que ocurrieron en el período 1905-1945 y 1946-1986, que corresponden respectivamente a períodos con la superficie del océano más fría y más cálida en los últimos 80 años (Jones et al., 1986), como ha sido realizado también en Australia (Pittock, 1983).

Los resultados obtenidos hasta ahora indican que la región Pampeana tendrá un clima más subtropical que el actual, pero una mayor aridez en el centro y el oeste. Por ello, la receptividad de los campos será menor, los pastizales tendrán que ser repoblados con especies subtropicales y el ganado deberá seleccionarse con razas, híbridos e individuos más tolerantes al calor.

También la agricultura tendrá que cambiar hacia una de tipo más subtropical, y sus cultivos sufrirán menos que en la actualidad los efectos de las heladas. Es notable cómo en la Patagonia la aptitud térmica para la agricultura será mucho más favorable que la actual, aunque siempre resultará escasa la precipitación y el riego será necesario.

La aptitud industrial se prevé que será menor que la actual, tanto por la disminución de la energía hidroeléctrica y aumento de la aridez, como por el aumento de la temperatura, especialmente en el centro y oeste del Cono Sur, ya que en las regiones orientales estas condiciones no resultan tan notables.

Bibliografía

— BREIMAN, L.; FRIDMAN, J.; RAFSKY y STONE, C. (1979): «An algorithm nonparametric recursive par-

tioning». Tech. Rept. Stanford Linear Acceleration Center.

— BUDYKO, M. I. (1956): «Tieplovoi balans semnoi poverchnosti» (Balance calórico de la superficie terrestre). *Gidromet*, 10 p. Moscú-Leningrad.

— BUDYKO, M. I. y EFIMOVA, L. S. (1968): «Iz poll-zovanie solechnoi energii privodim rastitiell nim prokrovom na terrtori SSSR». (El uso de la energía solar por la cubierta vegetal en la URSS). Leningrad.

— BUDYKO, M. I. (1971): «Klima i Zhizim». (Climate and Life). *Gidromet*. Leningrad. 472 pp.

— BURGOS, J. J. (1959): «El régimen hídrico de Sudamérica y su vegetación natural». Simp. Bases para la programación del Desarrollo Hidráulico Integral de las Regiones Áridas y Semiáridas. *Argentinas. Univ. Nac. de Cuyo*, p. 73-78, Mendoza Argent.

— BURGOS, J. J. (1959): «Macro, Meso and Micrometeorology as tools in the use of land in South America». Proc. of the WMO Symp. on Meteorology as related to Urban and Regional Land-use Planning. Asheville N.C., 3-7 Nov. 1972, pp. 39-91.

— BURGOS, J. J. (1982): «Bases climatológicas para la planificación de recursos naturales y artificiales renovables en la Amazonia Brasileira». *OMM-PNUD-SU-DAM*, 93 pp, mapas y gráficos.

— BURGOS, J. J. (1986): «Equilibrium and Extreme Climatic Conditions of the World's Biomes and Agrosystems», en Burgos, J. J. and William, G. D. V. (eds.) Land Use and Agrosystem Management under Severe Climatic Conditions. *Tech. Note N.º 188, WMO N.º 633*, p. 12-56, Geneve, Switzerland.

— BURGOS, J. J.; FUENZALIDA PONCE, H. y MOLION, L. C. B. (1988): «Climate change predictions for South America». *IGBP Southern Hemisphere Workshop, Mbabane, Swaziland, Dec. 11-16, 1988*.

— BURGOS, J. J. y MARONNA, R. (inédito): «Verificación estadística de modelos fito y edafoclimáticos aplicado al África, América del Sur y Australia». Buenos Aires.

— CLARK, W. C. (1985): «Scale of climate impacts». *Climate Change 7*, 5-27.

— CROWTHER, E. M. (1930): «The relationship of climatic and geological factors to the composition of soil clay and the distribution of soil types». Proc. of the Royal Soc. Sec. B. *Biological Sc.* p. 1-30.

— DICKINSON, R. E.; HENDERSON-SELLERS, A.; KENNEDY, P. J. and WILSON, M. J. (1986): «Biosphere Atmospheric transfer scheme (BATS) for the NCAR Community Climate Model». *NCAR Tech. Note 275*.

— DICKINSON, R. E. and HENDERSON-SELLERS (1988): «Modelling Tropical Deforestation: a study of

- GOM land-surface parametrizations». *Quart. J. Roy. Met. Soc.* 144: 439-462.
- EMANUEL, W. R.; SHUGART, H. H. y STEVENSON, M. P. (1984): «Climatic change and the broad scale distribution of terrestrial ecosystem complexes». *Climate Change* 7 (1): 29-43.
- GAUSSEN, H. (1954): «Theories et classification des climats et microclimats». Seme Congres. Internationales de Botanique, Paris, Section 7 et 3: 125-130.
- GROTH, S. L. (1988): «Regional intercomparisons of general circulation model predictions and historical climate data». U.S. Dept. of Energy Res. *TRO 41 CO₂*, 291 pp.
- HANSEN, J.; LACIS, A.; RIND, D.; RUSSELL, G.; STONE, P.; FUNG, I.; RUEDY, R. y LERNER, J. (1984): «Climate sensitivity: analysis of feedback mechanisms». *Geophys. Mono.*, 29: 130-163.
- HANSEN, J.; FUNG, I.; LACIS, A.; RING, D.; LEBEDEFF, S.; RUEDY, R.; RUSSELL, G.; STONE, P. (1988): a «Global Climate Changes as forecast by Goddard Institute for Space Studies Three-dimensional Model». *Jour. Geophys. Res.* Vol. 93 (D 8), 9341-9364.
- HANSEN, J.; RIND, D.; DEL GENIO, A.; LACIS, A.; LEBEDEFF, S.; PRATHER, M.; RUEDY, R. (1988 b): «Regional Greenhouse Climate Effects. Coping with Climate Change». Proc. of the 2nd. Conf. on Preparing for Climate Change 6-8/XII/1988. *Climate Institute*, Washington DC, 696 pp.
- HART, T. (1989): «Climate simulation with the BMRC global mode: Impact on changing physical parametrizations». Simp. sobre Variabilidad Climática y su Impacto Ambiental. Dept. Meteor. Fac. de Ciencias Exactas y Naturales UBA, 20/X/10/XI/1989, 37 pp. Buenos Aires, Argentina.
- HOLDRIDGE, L. R. (1947): «The determination of world plant formations from simple climatic data». *Science* 105: 367-368.
- JONES, P. D.; RAPER, S. C. y WIGLEY, T. M. (1986): «Southern Hemisphere surface air temperature variations, 1851-1984». *J. Clim. Appl. Meteorol.*, 25: 1213-1230.
- KAUPPI, P. y POSCH, M. (1987): «A case study of the effects of CO₂ - induced climatic warming on forest growth and the forest section A: Productivity reactions of Northern boreal forests». En *The impact of climatic variations on Agriculture*, Vol. I, *Assessment in Cool Temperature and Cold Regions*, ed. Parry, M. I. et al. Reidel, Dordrecht pp. 169-181.
- KOPPEN, W. (1923): «Die Klimate der Erde. Grundriss der Klimakunde». Berlin und Leipzig. X + 369 p., 8 tabl., 19 figs.
- KOPPEN, W. (1931): «Grundriss der Klimakunde». Berlin und Leipzig. walter de Gruyter Co. XII + 388 pp., 28 figs.
- LANG, R. (1915): «Versuch einer exakten klassifikation der Böden in Limatischer und geologischer Hinsicht». *Ints. Mitt. f. Bodenkunden*, 5, 8: 312-346, 1915.
- LITYNSKI, J. K. 1983: «Classification numerique des climatas mondiaux». Programme Mondiale des Applications Climatologiques. *PCM/WCP-OMM*, 46 pp.
- MARTONNE, E. de. (1926): «Une nouvelle fonction climatologique: l'Indice d'aridité». *La Météorologie*, Oct. 1926: 449-458.
- MANABE, S. y STRICKLER, R. F. (1964): «Thermal equilibrium of the atmosphere with a convective adjustment». *J. Atmos. Sci.*, 21: 361-385.
- MANABE, S. y WETHERALD, R. T. (1967): «Thermal equilibrium of the atmosphere with a given distribution of relative humidity». *J. Atmos. Sci.*, 24, 241-259, 1967.
- MANABE S. y WETHERALD, R. T. (1987): «Large-scale changes of soil wetness induced by an increase in atmospheric carbon dioxide». *J. Atmos. Sci.*, 44: 1211-1235.
- MITCHELL, J. F. B. (1983): «The seasonal response of a general circulation model to changes in CO₂ and sea temperature». *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 109: 113-152, 1983.
- MITCHELL, J. F. B.; WILSON, C. A. y CUNNINGTON, W. M. (1987): «On CO₂ climate sensitivity and model dependence of result». *Q. J. Royal Meteorol. Soc.*, 113: 293-322.
- MOHR, E. C. J. y VAN BAREN, F. A. (1954): «Tropical soils. A critical study of soil genesis as related to climate, rock and vegetation». *Interscience Pub.*, London, 280 pp.
- PITTOCK, A. B. y SALINGER, M. J. (1982): «Towards regional scenarios for a CO₂ - warmed Earth». *Climatic Change*, 4: 23-40.
- PITTOCK, A. B. (1983): «Recent climatic change in Australia: implications for a CO₂ - warmed Earth». *Climate Change*, 5: 321-340.
- PRESCOTT, J. A. (1931): «The soils of Australia in relation to vegetation and climate». Comm. of Australia. Council for Scientific and Industrial Res. *Bull.* N.º 52. Melbourne.
- SCHELESINGER, M. E. (1986): «Equilibrium and transient climatic warming induced by increased atmospheric CO₂». *Climate Dyn.* I: 35-51, 1986.
- SCHELESINGER, M. E. y MITCHELL, J. F. B. (1987): «Climate mode simulations of the equilibrium

- climatic response to increased carbon dioxide». *Rev. of Geophy.*, Vol. 2 (4): 760-798, 1987.
- SELLERS, W. D. (1969): «A global climate model based on the energy balance of the earth-atmosphere system». *J. Appl. Meteorol.*, 8: 392-400, 1969.
- SHUGART, H. H.; ANTONOWSKY M. Y.; JARVIS, P. G.; SANFORD, A. P. (1986): «CO₂ climatic change and forest ecosystems». En Bolin, B; B. R. Doos; J. Jager y R. A. Warwick, eds. «The Greenhouse effect, Climate Change and Ecosystem». *SCOPE* 29. J. Wiley and Sons. Chichester, 541 pp.
- THORNTHWAITE, C. W. (1931): «The climates of North America according to a new classification» *The Geograph. Rev. Oct.* 1931: 633-655.
- THORNTHWAITE, C. W. y HARH, F. K. (1955): «Climate classification in forestry». *Unasywa*, Vol. 9 (2), 1955, Roma.
- WALTER, H. y LIETH, H. (1961): «Klimadiagram-Weltatlas». *Jena*. Publ. Gustav Fisher.
- WANG, H. (1941): «Die Dauer der ariden, humiden und nivalen Zeiten des Jahres in China». *Tubingen Geog. und Geol. Abb.* 2, 7, Ohringen.
- WASHINGTON, W. M. y MEEHL, G. A. (1983): «General distribution model experiments on the climatic effects due to a doubling and quadrupling of carbon dioxide concentration». *J. Geophys. Res.* 88: 6600-6610, 1983.