

지표 조건에 따른 열대 대기경계층 변화의 사례 연구

권 병 희
부경대학교 위성정보과학연구소
(2001년 9월 2일 접수; 2001년 10월 26일 채택)

Case Study of Variations in the Tropical Atmospheric Boundary Layer According to the Surface Conditions

Byung-Hyuk Kwon

Institute of Satellite Information Science, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

(Manuscript received 2 September, 2001; accepted 26 October, 2001)

The Rondônia Boundary Layer Experiment (RBLE-II) was conceived to collect data on the atmospheric boundary layer over two representative surfaces in the Amazon region of Brazil; tropical forest and a deforested, pasture area. The present study deals with the observations of atmospheric boundary layer growth and decay. Although the atmospheric boundary layer measurements made in RBLE-II were not made simultaneously over the two different surface types, some insights can be gained from analysing and comparing with their structure. The greater depth of the nocturnal boundary layer at the forest site may be due to the influence of mechanical turbulence. The pasture site is aerodynamically smoother and so the downward turbulent diffusion will be much less, resulting in a lower surface temperature. The strength of thermal inversion is, consequently, higher over the pasture than over the forest. The development of the convective boundary layer is stronger over the pasture than over the forest. The influence of the sensible heat flux is important but may be not enough to explain the difference completely. It seems that energy advection may occur from the wet and colder (forest) to the dry and warmer area (pasture), rapidly breaking up the nocturnal inversion. Such advection can explain the abrupt growth of the convective boundary layer at the pasture site during the early morning.

Key words : atmospheric boundary layer, tropical forest, deforested, pasture

1. 서 론

다양한 생물의 존재와 대규모 멸종으로 인한 지역적 또는 전지구적 규모의 기후 변화 문제로 아마존 지역은 세계적 관심을 받아 왔다. 특히 기상학 분야에서, 아마존 숲의 파괴가 기후변화에 미치는 영향은 수년 동안 전지구모델(GCM: General Circulation Model) 실험의 주제였다. 이와 같은 모의실험의 결과는 온도의 증가와 습도의 감소라는 부분에서 일치를 보이고 있다. 즉 아마존 숲의 파괴는 온도를 약 0.6-2.0°C 증가시키고, 강수와 증발을 약 20~30%

감소시켜서, 그 결과 건조한 기간이 길어질 것이다. 이러한 기후변동은 아마존 지역의 생태계에 심각한 결과를 초래할 것으로 예측되고 있다.^{1~5)}

수치모의 결과의 최적화를 위하여 GCM은 복잡한 육지 표면 모수화를 포함하고 있으며,^{6~8)} 각기 성격이 다른 지역에서 정확하게 표면 모수화를 하기 위한 연구도 이루어지고 있다. 지표면과 대기가 서로 밀접하게 작용하기 때문에, 지역적인 기후와 날씨를 결정하기 위해서는 지표-대기 상호작용이 발생하는 대기경계층에 대한 연구가 중요하다.

Rondônia 경계층 실험(RBLE : Rondônia Boundary Layer Experiment)은 브라질의 아마존 지역에서 대표적인 지표면 상태인 열대 우림과 멸종된 목초지 위에서 대기경계층의 특징을 묘사할 수 있

Corresponding Author, Byung-Hyuk Kwon, Institute of Satellite Information Science, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea
Phone : +82-51-620-6873
E-mail : bhkwon@mail.pknu.ac.kr

는 기상 자료를 수집하기 위하여 실행되었다. 열대 목초지 위에서 대기경계층의 열역학적 구조와 성장에 관한 연구가 Martin⁹⁾에 의해 중앙 아마존 Manaus에서, 그리고 Lyra¹⁰⁾에 의해 적도 아프리카 지역에서 이루어졌다. Fisch¹¹⁾는 RBLE-II 실험에서 모델을 이용하여 지표면 상태에 따른 열대 대기경계층의 변화를 설명하였다. 본 연구에서는 RBLE-II 기간 동안 아마존 숲과 벌채된 목초지에서 관측된 대기경계층의 성장과 소멸을 비교 분석하였다.

2. 자료

RBLE-II 실험은 1993년 전기(7월)에 아마존 열대 우림의 남동부 지역인 Rondônia주 Ji-Paraná에서 수행되었다(Fig. 1). 이 선정된 실험 지역은 심한 벌채로 황폐화된 지역이기는 하지만 벌채 이후의 목초지와 숲이 공존하여 대기경계층 연구에 적합한 지역이다. RBLE-II 실험 지역은 ABRASCO 실험과 동일한 지역으로써 숲에서의 관측 지점은 Reserva Jaru ($10^{\circ} 5' S$, $61^{\circ} 55' W$)의 해발 120 m에 위치하고, 목초지는 Fazenda Nossa Senhora da Aparecida ($10^{\circ} 45' S$, $62^{\circ} 22' W$)의 해발 220 m에 위치했다.



Fig. 1. Location of the RBLE-II.

우림의 평균 높이는 30m이고, 목초지의 식물은 대부분 80년대 초반에 조성된 잔디로 구성되어 있는 전형적인 목장지이다.

우림 지역과 목초지 두 실험지역에서 얻은 대기경계층 자료는 동시에 관측되지는 않았다. 각 지역에서 라디오존데(radiosonde)와 테드존데(tether-

sonde)에 의한 대기경계층의 연직 구조는 0200, 0500, 0800, 1100, 1400, 1700, 2000 그리고 2300 LST (Local Time)에 산출되었다. 모든 고층기상관측은 350 g의 풍선과 Vaisala RS80-15 시스템을 이용하여 기압, 기온, 습도를 측정하였고, 풍속과 풍향은 Omega 네트워크로 결정하였다. 고층기상자료의 측정 범위와 분해능은 Table 1과 같다. A.I.R.사에서 제작된 테드존데는 Zepellin 모양으로 기압과 건구 및 습구 온도 그리고 풍향, 풍속을 측정한다. ADAS(Atmospheric Data Aquisition System)로 수집되는 기온, 기압, 상대습도, 풍속 그리고 풍향의 분해능은 각각 0.1°C , 0.1hPa , 1% , 0.1m/s 그리고 1degree이다. 대기경계층에 대한 정보를 보충하기 위하여 매시간 기온, 상대습도, 풍향, 풍속, 순복사속 그리고 강수 자료를 저장할 수 있는 자동기상관측기를 설치하였으며, 에디상관측기도 설치하여¹²⁾ 운동량속과 난류에너지지를 매시간 단위로 산출하였다.

Table 1. Measuring range and resolution of the radiosonde.

	Temperature	Relative Humidity	Atmospheric Pressure
Measuring Range	-90 to +60°C	0 to 100%	3 to 1060 hPa
Resolution	0.1°C	1%	0.1 hPa

RBLE-II 기간 중에서 1993년 7월 3일-10일에는 우림 지역에서 먼저 열대 대기경계층의 관측 실험이 이루어졌으며, 이 기간의 관측을 '관측A'라 칭한다. 이후 일주일 동안 모든 장비는 목초지로 옮겨져 1993년 7월 18일-25일 두 번째 7일간의 관측이 실행되었고, 이 기간의 관측을 '관측B'라 칭한다. 관측A 동안 남쪽에서 유입된 차가운 공기파가 Ji-Paraná를 가로질러 지나가면서 대기 구조를 변형시켰다. 이 지역에 일반적인 이러한 현상을 본 연구에서는 제외하였다. 따라서 관측B에서는 7일간의 모든 자료를 이용한 반면, 관측A에서는 7월 7일-9일을 제외한 4일간의 자료를 분석하였다. 열대 우림 지역과 목초지에서 대기경계층의 주요 특성을 결정하기 위해서 라디오존데와 계류기구를 이용하여 수집된 기상 자료의 연직 분포를 중심으로 분석하였다.

2.1 Ji-Paraná 지역의 기후

Ouro Preto d'Oeste에서 관측된 기상 자료(CEPLAC: Comissão Executiva da Lavoura do Cacau에서 제공)를 이용하여 간단하게 분석된

Ji-Paraná에서의 기후 변화를 Fig. 2에서 보여준다. CEPLAC 관측 지점은 Fazenda Nossa Senhora에서 약 20km, Reserva Jaru에서 약 80km 떨어진 지점에 위치한다. Fig. 2는 Ji-Paraná 지역의 강수와 기온의 연변화를 나타내고 있다. 1982년부터 1992년까지의 월평균 분석은 열대 우림 지역에서 건기와 우기로 나눌 수 있는 분명한 계절 특성을 보이고 있다. 11월~4월의 우기에는 월평균 강수량이 200mm 이상이며, 건기(6월~8월)에는 월평균 강수량이 20mm에도 미치지 못한다. 일반적으로 7월에는 월평균 강수량이 5mm 보다 작지만 건기에 소나기가 내리기도 한다. 이 소나기는 5월~9월 사이에 연평균 7회 정도이고 7월에만은 2~3회 발생한다. 기온은 10월에 가장 높은 25.5°C를 보이고, 7월에 가장 낮은 22.6°C를 보여 미약하지만 계절적인 변화를 하고 있다. 10월은 건기가 끝나는 시점과 일치하고, 7월의 낮은 기온은 남쪽으로부터의 차가운 공기의 유입에 기인한다.

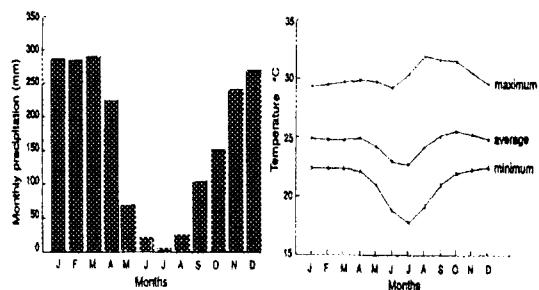


Fig. 2 Climatological patterns of rainfall and temperature for Ji-Paraná, 1982-1992 (source: CEPLAC).

2.2 RBLE-II의 미기상

관측A와 관측B 동안의 우림 지역과 목초지에서 일평균 현열속과 잠열속 그리고 순복사속을 산출하였고, 이에 따라 평균 에너지 수지가 매일 계산되었다. 우림 지역에서는 강한 대류에 기인한 대류운이 관측되었고, 목초지 관측기간에는 종관규모의 고기압 영향이 지배적이어서 대류운은 나타나지 않았다. 구름이 없었던 관측A 기간에 더 많은 태양복사가 관측되었는데, 이는 현열속과 잠열속의 서로 다른 에너지 분담을 유도하였다. Fig. 3은 1993년 7월 에너지 수지의 시계열 분포를 보여주고 있다. 우림 지역에서 현열속의 증가와 증발산의 감소로 평형을 이루면서 순복사속이 약간 증가하였다. 목초지에서는 증발과 토양열속의 증가와 현열속의 감소와 더불어 순복사속이 11%까지 증가하였다. 증

발의 증가는 관측 시작 이전에 내렸던 강수가 토양을 과포화시켰기 때문이다.

Table 2에서 가강수량이 관측A와 관측B 동안에 3.8 g/cm^2 에서 2.6 g/cm^2 로 감소한 것은 종관규모의 고기압 영향으로 보인다. US National Meteorological Center에서 산출되는 종관 일기도에 따르면, 관측A 기간의 1500hPa 지오포텐셜면의 고도는 1540m이고 남북 성분의 수평 바람은 미약하여 약 2 m/s 였다. 7월 22일에 강한 고기압이 형성되기는 하였으나 관측B 동안에도 바람이 약한 아주 유사한 종관 상태였다.

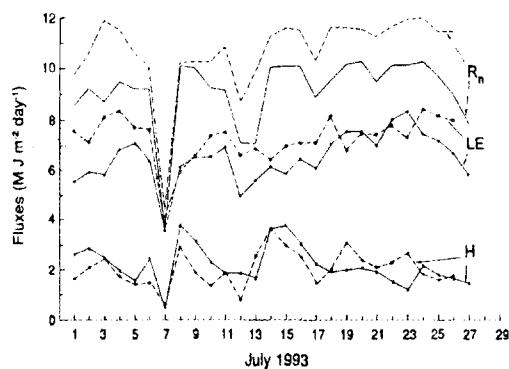


Fig. 3. Time series of the components of the energy budget fluxes: net-radiation (R_n), sensible heat (H) and latent heat (LE), at the forest (---) and pasture (—) sites during RBLE-II.

Table 2 Average integrated values from fluxes of solar radiation (S), net-radiation (NET), sensible heat (H) and latent heat (LE) fluxes, daily average of air temperature (T) and integrated precipitable water (WP).

	S ($\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$)	NET ($\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$)	H ($\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$)	LE ($\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$)	T ($^{\circ}\text{C}$)	WP (g cm^{-2})
Forest A	18.8	11.9	2.0	9.8	25.5	3.8
Forest B	20.6	12.1	2.5	9.6	24.4	
Pasture A	17.7	10.1	2.7	7.0	25.5	
Pasture B	20.1	11.2	2.2	8.7	24.0	2.6

3. 야간 대기경계층

2000, 2300, 0200 그리고 0500 LST에 계류기구로 측정된 기상 자료로부터 얻은 야간 대기경계층의 대표적인 특성인 야간 대기경계층의 고도와 안정강도를 Fig. 4와 Fig. 5에서 보여주고 있다.

Stull¹³⁾은 야간 대기경계층을 가온위의 연직구배가 0이 되거나 대기 난류가 소멸되는 고도까지로 정의하였고, Garratt¹⁴⁾ 또한 같은 방법을 제시하였으나 가온위 대신 기온을 이용하여 두 방법에 의한 결과는 차이를 보이기도 하였다. 본 연구에서는 야간 대기경계층의 고도로 온도의 연직구배가 0.01K/m 보다 작아지는 고도를 채택하였다. Fig. 4는 두 관측 지역에서 각기 매 3시간마다 온도의 연직분포로부터 산출한 야간 대기경계층의 평균 높이를 보여주고 있다. 야간 내내 우림 지역에서의 경계층이 목초지에서 보다 높고, 두 지역에서 모두 2000LST에서 0500LST 까지 시간에 따라 야간 안정층이 깊어지는 것을 알 수 있다.

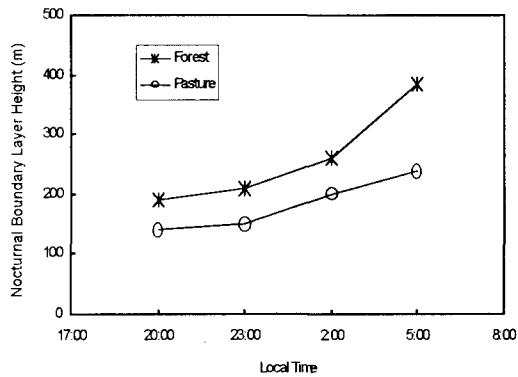


Fig. 4. Height of nocturnal boundary layer at the forest and pasture.

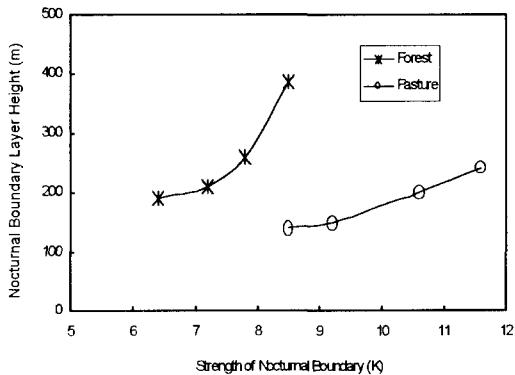


Fig. 5. Strength of nocturnal boundary layer at the forest and pasture.

우림 지역의 경우 2000LST에 이미 안정층이 약 190m까지 발달했으며 지표면과 안정층 상부와의 온도 차이는 6.4K였다.

지표에서 야간 복사냉각이 지속됨에 따라 안정층

은 더욱 깊어져서 2300LST에 210m, 0200LST에 260m 그리고 0500LST에 385m로 발달한다. 이 고도들은 중앙 아마존에서 관측된 야간 대기경계층 고도 보다 약간 높거나 같다.⁹⁾ 시간이 지남에 따라 안정층이 깊어지고 안정강도 또한 높아지고 있다 (2300LST: 7.2K, 0500LST: 8.5K). 경계층 내의 모든 고도에서 기온이 일출 시점(0500 LST)까지 거의 일정하게 하강하고, 야간 최대 기온 감소율은 2000LST와 2300LST 사이에 약 1.1K/h이다. 목초지에서도 동일한 변화의 경향을 보이고, 특히 지표면이 안정층 발달에 미치는 영향이 두드러진다. 2000LST에 안정층 고도 140m에서 기온은 305.3K이고, 안정층 고도는 계속 증가하여 0200 LST에 150m 그리고 0500LST에 200m까지 올라간다. 야간 역전강도는 2000LST에 8.5K에서 0500 LST에 11.6K로 증가하며, 안정층 내의 기온 감소율은 1.4K/h로 우림 지역에서 보다 다소 빨리 냉각된다. 숲이 없는 지역에서는 지구·장파복사가 더 커서 역전강도가 커지고, 안정층 전체가 더욱 냉각된다. 역전강도는 야간 경계층 고도에서의 기온과 지표면에서의 온도 차이로 정의된다. Fig. 5는 역전강도가 클수록 야간 대기경계층이 깊어지는 것을 보여주고 있다.

두 관측 지점에서 야간 대기경계층의 발달을 가장 잘 보여주는 7월 5일-6일(우림 지역)과 7월 23일-24일(목초지)의 온도의 연직분포를 Fig. 6에서 보여주고 있다. 온도 분포에 나타나는 야간 대기경계층의 높이 보다 매우 낮은 고도에서 기온의 변곡점이 나타난다. 야간 대기경계층의 높이 산출은 차이가 있으나 경계층의 발달은 더 효율적으로 표현된다. 우림에서의 야간 안정층 높이는 목초지에서 보다 높다는 것을 쉽게 확인할 수 있다. 안정층 내에서 시간에 따른 기온 감소율은 2000LST에서 2300LST 사이가 가장 높으며, 0500LST까지는 비교적 서서히 기온이 하강한다.

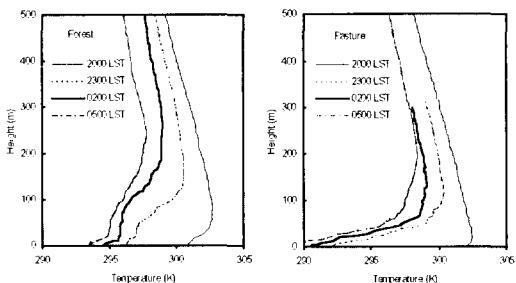


Fig. 6. Nocturnal evolution of the virtual temperature profile on the night of July 5-6 (left) and July 23-24 (right).

4. 주간 대기경계층

0800, 1100, 1400 그리고 1700LST에 라디오존대 관측을 중심으로 분석한 대류적으로 발달한 대기경계층의 특징을 Fig. 7과 Fig. 8에서 보여주고 있다. 라디오존대 관측은 테드존데 보다는 연직 해상도가 낮지만 주간에 발달한 대기경계층 고도에서 나타나는 가온위의 불연속성을 찾는데는 문제가 없다. Fig. 7은 우림과 목초지에서의 대기경계층 구조를 요약하여 보여준다. 야간 경계층과 마찬가지로 두 관측 지역에서 각기 매 3시간마다 가온위의 연직 분포로부터 산출한 대류적으로 발달한 대기경계층의 평균 높이를 보여주고 있다. 0800LST에 목초지의 경계층 높이 110m는 우림에서의 200m 보다 낮지만, 혼합고 성장률이 493m/h로 1100LST에는 1590m로 우림에서 관측된 혼합고 580 m 보다 매우 높고 1700LST에는 2220m까지 발달한다. 혼합층 내의 평균 가온위는 298.6K에서 305.6K로 증가하여 시간당 2.3K씩 증가했다. 0800LST에 200m 정도이던 혼합고는 성장률 127m/h로 1100LST에 580m까지 급속하게 발달한다. 1400LST에 1150m 그리고 1700LST에 1250m까지 발달하여 오후에는 성장률이 낮음을 알 수 있다. 경계층의 평균 온위는 0800LST에 299.8K에서 오후에 307.2K까지 증가한다. 가열율은 일출 후에 야간 경계층이 태양복사로 파괴될 때 최대 1.6K/h가 되고 1400LST까지 0.8K/h로 감소하다가 이후로는 일정하게 유지된다. 오후에 지표면 가열이 감소하는 대신, 대기경계층은 상부에서 둡고 진조한 공기의 유입으로 가열된다. Tennekes^[15]와 Driedonks^[16]는 경계층 상부의 역전층 위에서 기온의 연직구배는 종관 변화에 영향을 받고 시간에 따라 변하지 않는다고 했는데, 본 연구에서는 0800LST에 18K/km에서 1700LST에 3.3K/km로 증가한다. 이상과 같은 Rondônia에서의 대기경계층에 대한 관측 결과는 Manaus에서 관측된 결과와 차이가 없다.^[9]

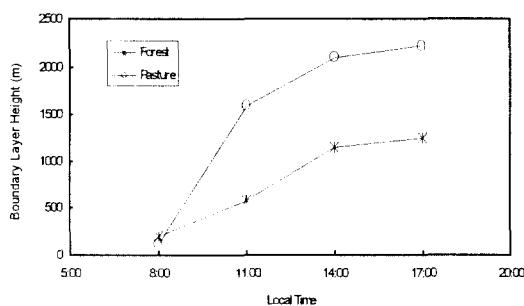


Fig. 7. Evolution of convective boundary layer at the forest and pasture.

Fig. 8은 우림에서 7월 6일과 목초지에서 7월 23일 주간(0800 LST-2000 LST)에 관측된 대표적인 가온위의 연직 분포이다. 이 그림에서 고도는 해발고도로 우림에서는 120m 그리고 목초지에서는 220m를 고려해야 한다. 0800LST와 1100LST의 대기경계층 하부에 야간의 대기경계층을 나타내는 안정층이 남아 있고 1400LST에는 나타나지 않는다. 숲이 없는 일반 내륙 지역이나 해양에서 일반적으로 1400LST 전후에 대기경계층의 최고가 나타나는 현상과는 다르게 우림 지역과 목초지 모두에서 1700LST 전후에 최대 혼합고가 형성되고, 2000LST까지 대기혼합이 지속된다. 이는 숲과 목초지라는 지표 조건뿐만 아니라 적도에 가까운 열대 지역이기 때문에 일조량과도 관련이 있다.

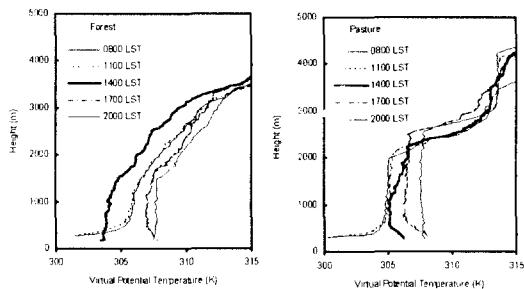


Fig. 8. Vertical profiles of virtual potential temperature observed at the forest site (6 July) and the pasture site (23 July).

5. 요약 및 결론

RBLE-II 실험에서 우림 지역과 목초지에서의 대기경계층 관측이 동시에 이루어지지는 않았지만 지표면 조건이 서로 다른 두 지역에서의 대기경계층을 비교 분석하여 그 구조의 특성을 파악할 수 있었다. 우림 지역에서 야간 대기경계층이 더 깊게 발달하는 것은 수평 바람의 연직시어와 같은 기계적 난류에 기인한다. 야간에 숲에서는 공기역학 거칠기가 매우 높아서 연직 확산이 활발해진다. 목초지에서는 공기역학적으로 비교적 매끄럽기 때문에 하향 난류 확산이 줄어들고 지표면 온도가 올라가지 못한다. 결과적으로 역전강도가 목초지에서 48.3 K/km로 우림 지역에서의 22.4K/km 보다 크다. 주간의 대기경계층은 우림 지역에서 보다 목초지에서 더 깊게 발달한다. 지표면 혼합속이 혼합층 발달에 중요한 역할을 하는데 두 지역에서 구체적으로 나타나는 차이점은 분명하지 않다. 정책적인 면제가 만들어 낸 민동 지역은 그 주변의 에너지 차원에서 대조적인 숲과 이웃하여 열적인 국지 이차순환을

유발한다. 따라서 습하고 차가운 우림 지역에서 건조하고 더운 목초지로의 에너지 이류가 발생하여 목초지에서의 야간 역전층의 성장을 완화시키거나 급격히 파괴할 수 있다. 이에 따르는 결과는 일출 후에 목초지에서 갑자기 대류적으로 깊어지는 대기 경계층을 유발한다.

참 고 문 헌

- 1) Dickinson, R. E. and A. Henderson-Sellers, 1988, Modelling tropical deforestation: a study of GCM land-surface parameterizations. *Q. J. Roy. Met. Soc.*, 114, 439-462.
- 2) Lean, J. and D. A. Warriow, 1989, Simulation of the regional climate impact of Amazon deforestation. *Nature*, 342, 411-413.
- 3) Nobre, C. A., P. J., Sellers and J. Shukla, 1991, Amazonian deforestation and regional climate change. *J. Climate*, 4, 957-988.
- 4) Henderson-Sellers, A., R. E. Dickinson, T. B. Durbigde, P. J. Kennedy, K. McGuffie, and A. J. Pitman, 1993, Tropical deforestation modelling local to regional scale climate change. *J. Geophys. Res.*, 98, 7289-7315.
- 5) Manzi, A. O., 1993, Introduction d'un schema des transferts sol-vegetation-atmosphere dans un modèle de circulation générale et application à la simulation de la deforestation Amazonienne. PhD Thesis, Paul Sabatier University, Toulouse (France), 230 pp.
- 6) Dickinson, R. E., Henderson-Sellers, A., Kennedy, P. J. and Wilson, M. F., 1984, Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) for the NCAR community climate model. NCAR Technical Note TN-275+STR, 69 pp.
- 7) Noilhan, J. and S. Planton, 1989, A simple parameterization of land surface process for meteorological models. *Mon. Weath. Rev.*, 117, 536-549.
- 8) Sellers, P. J., Y., Mintz, Y. C. Sud and A. Dalcher, 1986, A simple biosphere model (SiB) for use within the General Circulation Models. *J. Amos. Sci.*, 43, 505-531.
- 9) Martin, C. M., D. R. Fitzjarrald, M. Garstang, A. P. de Oliveira, S. Greco, and E. Browell, 1988, Structure and growth of the mixing layer over the Amazonian rain forest. *J. Geophys. Res.*, 93, 1361-1375.
- 10) Lyra, R., A. Druilhet, B. Benech and C. Bouka Biorna, 1992, Dynamics above a dense equatorial rain forest to the free atmosphere. *J. Geophys. Res.*, 97, 12953- 12966.
- 11) Fisch, G., 1995, Camada Limite Amazônica aspectos observacionais e de modelagem. PhD Thesis, INPE, São José dos Campos, Brazil.
- 12) Shuttleworth, W. J., J. H. C., Gash, C. R., Lloyd, D. D., McNeil, C. J., Moore and J. S. Wallace, 1988, An integrated micrometeorological system for evaporation measurements. *Agric. For. Met.*, 43, 295-317.
- 13) Stull, R. B., 1988, *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 666 pp.
- 14) Garratt, J. R. 1992. The atmospheric boundary layer. Cambridge University Press, 316 pp.
- 15) Tennekes, H., 1973, A model for the dynamics of the inversion above a convective boundary layer, *J. Amos. Sci.*, 30, 558-567.
- 16) Driedonks, A. C. M., 1982, Model and observations of the growth of the atmospheric boundary layer. *Bound.-Layer Met.*, 23, 283-306.