

LOS RIESGOS DE HELADA PARA LA AGRICULTURA EN EL ALTIPLANO BOLIVIANO

Ph. Le Tacon¹, G. Allinol¹, J.J. Vacher¹, R. Bosseno¹, M. Eldin¹, E. Imaña², R. Maldonado²

1: ORSTOM C.P. 9214, La Paz-Bolivia
2: SENAMHI C.P. 10993, La Paz-Bolivia

Symposium / Workshop on practical applications of agrometeorology to plant protection OMM, Asunción,
1-10 april 1992

I INTRODUCCION

Las crónicas españolas del siglo XVI y XVII subrayaban ya la influencia muy limitante de las heladas sobre la agricultura del Altiplano. Las frecuentes destrucciones de los cultivos y en particular de la papa (*Solanum tuberosum ssp andigenum*) son confirmadas por los campesinos y los técnicos agrícolas. Sin embargo, a pesar de su importancia, no existe todavía un estudio preciso de los riesgos de helada en el Altiplano. El programa de investigación sobre la agroclimatología del Altiplano, que está realizando el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) de Bolivia en colaboración con la ORSTOM, consideró entonces como tema prioritario el análisis de las heladas. En el presente artículo serán presentados los primeros resultados del análisis frecuencial y del análisis local de los riesgos de helada, así como su zonificación con el uso de imágenes infrarojas nocturnas del satélite NOAA-AVHRR.

II ANALISIS FRECUENCIAL DE LOS RIESGOS DE HELADAS

Como inicio del estudio de los riesgos de heladas en el Altiplano, se realizó un análisis frecuencial de la ocurrencia de una temperatura inferior a una temperatura límite. Para este análisis se utilizaron los datos diarios de 15 años de registro (1973-1988) de 14 estaciones del SENAMHI (anexo 1). El efecto de las heladas varía mucho según los cultivos y las variedades, el valor de la temperatura límite para una zona agrícola dependerá de la sensibilidad de los cultivos más importantes. Para el Altiplano se escogió como referencia el cultivo de la papa, cultivo de gran importancia en el Altiplano y más afectado por las heladas. Según varios autores (Ventskevitch, 1958; Li y Palta, 1978) y la experiencia de campo, se ha considerado para el cultivo de la papa con la variedad Sani Imilla (variedad muy divulgada en el Altiplano) una destrucción de las plantas a -3°C durante el crecimiento vegetativo y a -2°C después de la floración.

Con los datos diarios de 4 años de medición de temperatura mínima, a 150 cm y a 35 cm de dos estaciones meteorológicas automáticas ubicadas en el Altiplano Norte y en Altiplano Central, se consideró una diferencia promedio de 1°C entre la temperatura mínima a nivel de la caseta y la temperatura mínima al nivel del cultivo. Se determinó entonces el riesgo de helada como la frecuencia de ocurrencia de una temperatura mínima al nivel de la caseta inferior a -1°C durante el crecimiento vegetativo e inferior a -2°C después de la floración. El intervalo de estudio fue de 10 días (décadas).

La figura 1 representa la frecuencia de heladas para la estación de Viacha (30 km al Sur de La Paz). Se observa muy nítidamente la intensidad del riesgo de heladas; solamente 20 días son totalmente libres de heladas y 1 año entre 4 el período libre de heladas es inferior a 100 días. Para esta estación, el cultivo de papa tiene una probabilidad superior a 30% de ser destruido por una helada.

Las heladas en el Altiplano son muy frecuentes pero presentan, sin embargo, una heterogeneidad regional según un gradiente Nor-Este Sur-Oeste y según la influencia del lago Titicaca (cuadro 1 y figura 2). El cultivo de la papa aparece sin riesgos en las riberas del lago Titicaca (Copacabana) y con una frecuencia de heladas superior a 90% en el Sur-Oeste

Fonds Documentaire IRD



010025915

Fonds Documentaire IRD

Cote: Bx 25915 Ex: unique

figura 1:

Frecuencia de heladas para el cultivo de papa en Viacha

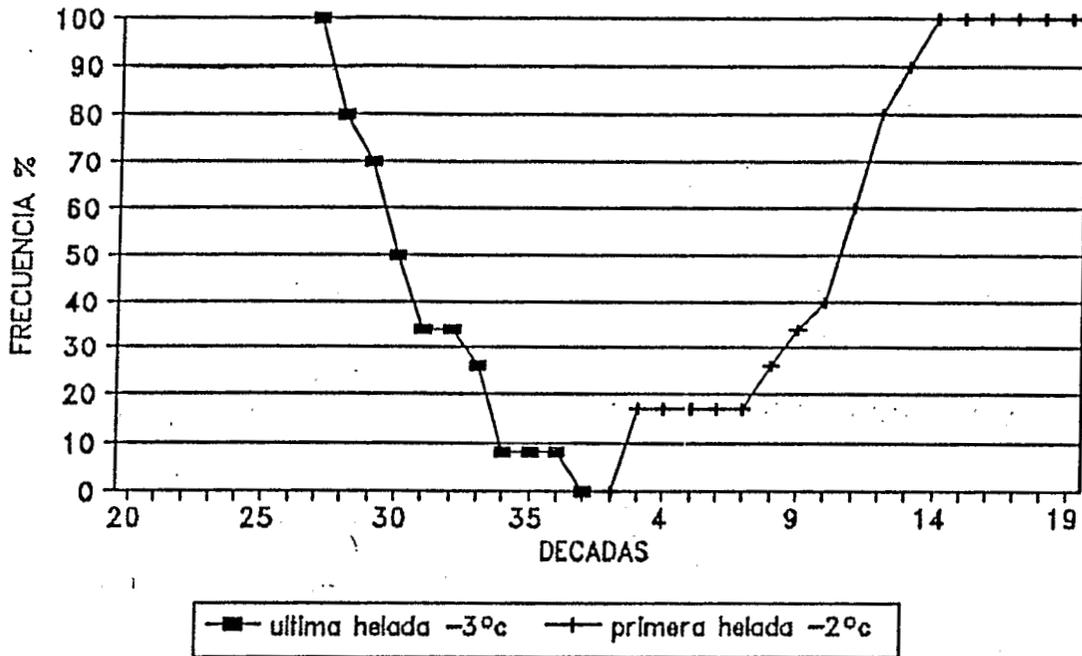
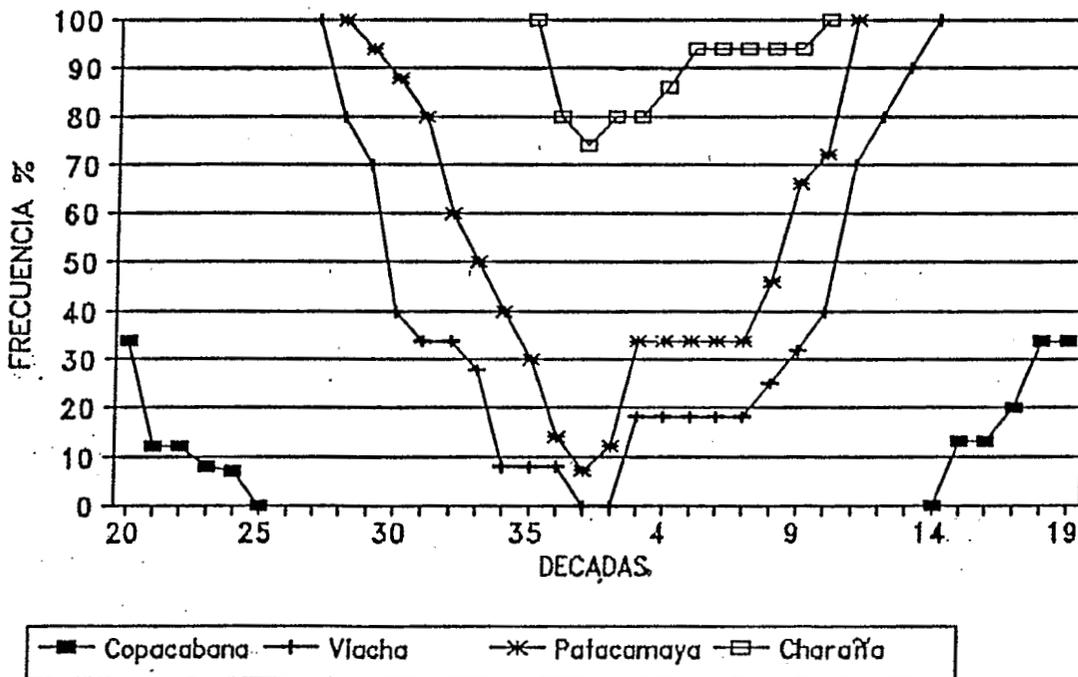


figura 2:

Frecuencia de heladas para el cultivo de papa en 4 estaciones del Altiplano



Cuadro 1 : Características de diferentes estaciones del Altiplano

ESTACION	P90	P120	P50%
AYO-AYO	20	10	56
CALACOTO	45	15	65
CARACOLLO	75	60	124
CHARAÑA	7	0	2
COLLANA	85	85	174
COMANCHE	20	7	49
COPACABANA	100	100	360
EL ALTO	90	72	160
EL BELEN	40	25	58
HUARINA	77	65	153
ORURO	70	40	109
PATACAMAYA	62	45	114
TIHUANACU	60	45	113
VIACHA	82	70	164

P90: Probabilidad de tener 90 días libres de heladas para la papa.

P120: Probabilidad de tener 120 días libres de heladas para la papa.

P50%: Promedio de días libres de heladas para la papa.

Diferentes grupos han podido ser diferenciados (Le Tacon Ph., 1989), sin embargo, la red insuficiente de estaciones no permite ninguna zonificación. Además las heladas de origen radiativo (Le Tacon et al., 1992), pueden presentar una importante variación local y reducir así la representatividad de las estaciones meteorológicas.

III ANALISIS LOCAL DE LOS RIESGOS DE HELADAS

Varios estudios (Hocevar y Martsolf, 1971; Bootsma, 1976; Laughlin y Kalma, 1987) han demostrado el efecto importante del relieve sobre la temperatura mínima. Observaciones del campo, así como los discursos de los campesinos, corroboran la importante influencia de la topografía sobre el riesgo de helada e indican variaciones debido al tipo de suelo. Para estudiar la influencia de estas dos variaciones, se analizaron las temperaturas mínimas en diferentes parcelas de varios agricultores para tener un abanico de posiciones topográficas y de tipo de suelo y evaluar la diversidad de condiciones de "riesgos de helada" disponible para cada campesino.

Las mediciones de las temperaturas mínimas, a lo largo de una ladera, mostraron variaciones muy importantes. Fueron registradas diferencias superiores a 10°C entre parcelas de la ladera (las más calientes), y parcelas planas de final de ladera (las más frías). En estas últimas, la temperatura límite para el cultivo de la papa ocurrió el 31 de enero y en las primeras, el 2 de mayo. La distancia entre las mediciones fue inferior a 200 m, y la diferencia de altura inferior a 40 m. En más de 100 parcelas campesinas estudiadas, la posición topográfica explica 70% de las variaciones de temperatura mínima.

Según el tipo de suelo, se registraron diferencias del orden de 1 a 3°C. Muy inferiores al efecto de la topografía, el tipo de suelo, no obstante, permite alargar o reducir el ciclo de la papa de 10 a 30 días. De acuerdo al conocimiento de los campesinos, los suelos muy pedregosos se mostraron más calientes y los suelos limo-arenosos más fríos, los suelos arcillosos teniendo una posición intermedia.

Estos resultados mostraron que cada agricultor en el Altiplano dispone de un espacio con una gran heterogeneidad de riesgos de helada. Esta variación local de la temperatura mínima es muy utilizada por el agricultor para sus fechas de siembra y las variedades del cultivo, para dispersar así el riesgo agroclimático (De Thuy E. y Guirlet C., 1988).

IV ZONIFICACION DE LOS RIESGOS DE HELADA EN EL ALTIPLANO BOLIVIANO CON LA INFORMACION DE IMAGENES INFRAROJAS TERMICAS DEL SATELITE NOAA-AVHRR

La escasez de estaciones meteorológicas con mediciones de temperatura mínima (14 estaciones para 100.000 km²) y su insuficiente repartición (ver anexo 1), así como la importante heterogeneidad local, nos impiden llegar a una zonificación precisa con la sola información de las estaciones meteorológicas.

Cuatro veces por día, satélites NOAA sobrevuelan el Altiplano boliviano con datos de temperatura de superficie con una resolución al suelo de 1 km². Con la información de pasadas satelitarias nocturnas, tratamos de llegar a una discriminación de zonas más y menos frías y obtener así una zonificación precisa de los riesgos de heladas.

1. Metodología

La información de los canales infrarojos térmicos C4 y C5, permite, después de una calibración, obtener las temperaturas radiativas T4 y T5. La combinación lineal de estas dos temperaturas nos da la temperatura de superficie (Ts), según la siguiente fórmula de Split Window (Hagolle, 1991):

$$T_s = -2,2 + 3,6 T_4 - 2,6 T_5$$

Previamente, se realizan correcciones atmosféricas de las imágenes tomando como referencia el océano, lo que no siempre es muy adaptado a las zonas de estudio y conduce entonces a determinar las relaciones entre la Ts a las 2 h de la mañana (hora de la pasada del satélite) y las T min del mismo día de las estaciones meteorológicas del Altiplano. Estas relaciones ($T_s = f(T_{min})$) dependen de varios parámetros meteorológicos, del relieve y del complejo suelo-planta y de su estado hídrico (Guillot B., 1981; Guyot G. y Seguin B.; 1988), deberán ser establecidas para cada estación:

2. Resultados

Para la zonificación de los riesgos de helada, disponíamos de 7 imágenes infrarojas nocturnas NOAA para la temperatura de superficie y de 2 imágenes diurnas para el índice de vegetación. Cada imagen tiene una superficie de 120.000 km² y cubre todo el Altiplano Norte y Central de Bolivia. Las imágenes nos fueron proporcionadas por el Centro de Estudios Espaciales de la Universidad de Chile a través de la Cooperación Regional de la Embajada de Francia en Chile.

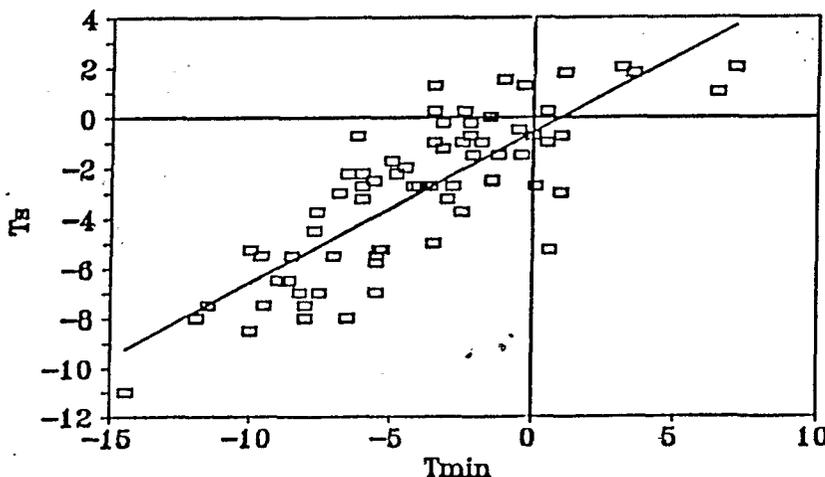


Fig. 3: Relación entre Tmin del aire (estación) y Ts noche (NOAA).

El coeficiente de correlación obtenido entre las Ts de las 7 imágenes y las Tmin de las estaciones meteorológicas es de 0,81, con una precisión de transformación entre Ts y Tmin de 2° (fig. 3). Para precisar la zonificación se determinaron las correlaciones y la relación lineal entre Ts y Tmin (cuadro 2). Para poder extrapolar esta relación lineal, se buscó el significado de los coeficientes a y b de la relación $T_s = a T_{min} + b$. El coeficiente aparece muy correlacionado con el índice de vegetación, la latitud y la longitud (cuadro 3). Debido a las correlaciones entre el índice de vegetación y la latitud y longitud, fue posible establecer una relación directa entre a y las dos últimas variables del tipo:

$$a = 0,18 \text{ Lat} + 0,35 \text{ long} - 20,25$$

**Cuadro 2 : Relación entre temperatura mínima del aire (estación) y temperatura de superficie (NOAA).
Regresiones de diferentes estaciones**

ESTACION	a	b	R	NUMERO DE OBSERVACIONES
AYO-AYO	0.71	+1.04	0,88	8
CALACOTO	0.59	-0.60	0,81	9
CHARAÑA	0.57	-3.14	0,96	8
COLLANA	0.86	-0.88	0,79	8
COMANCHE	0.25	-3.21	0,66	7
COPACABANA	0.31	-1.22	0,67	7
EL BELEN	0.44	+0.09	0,85	7
HUARINA	1.25	+2.26	0,91	10
ORURO	0.61	-0.38	0,92	8
PATACAMAYA	0.76	-0.24	0,83	8
VIACHA	0.78	+1.25	0,75	9

Cuadro 3: Correlación entre a, I.V. y coordenadas geográficas

var.1	var.2	coef. correl.
a	I.V.	0.94
I.V.	latitud	0.92
I.V.	longitud	0.92

Sin embargo, esta relación tiene sus límites, el índice de vegetación utilizado corresponde a un solo período (febrero-marzo) cuando la biomasa vegetal es máxima y se trabajó sobre todo con estaciones ubicadas en la parte Nor-Oeste del Altiplano. En cuanto al coeficiente b, no se encontró correlaciones altas en otras variables, parece, sin embargo, estar relacionado con la altura.

3. Zonificación

La zonificación fue realizada a partir de las regresiones establecidas entre Ts et Tmin y de la información de las siete imágenes nocturnas (fig. 4). Se observa nítidamente un gradiente Nor-Este Sur-Oeste, así como la influencia marcada pero limitada en el espacio del lago Titicaca, lo que corrobora los resultados obtenidos con el análisis de los datos meteorológicos. Se puede notar también, zonas más calientes en la parte Sur del Altiplano, que corresponden a los salares de Coipasa y de Uyuni, particularidad que será estudiada in-situ próximamente.

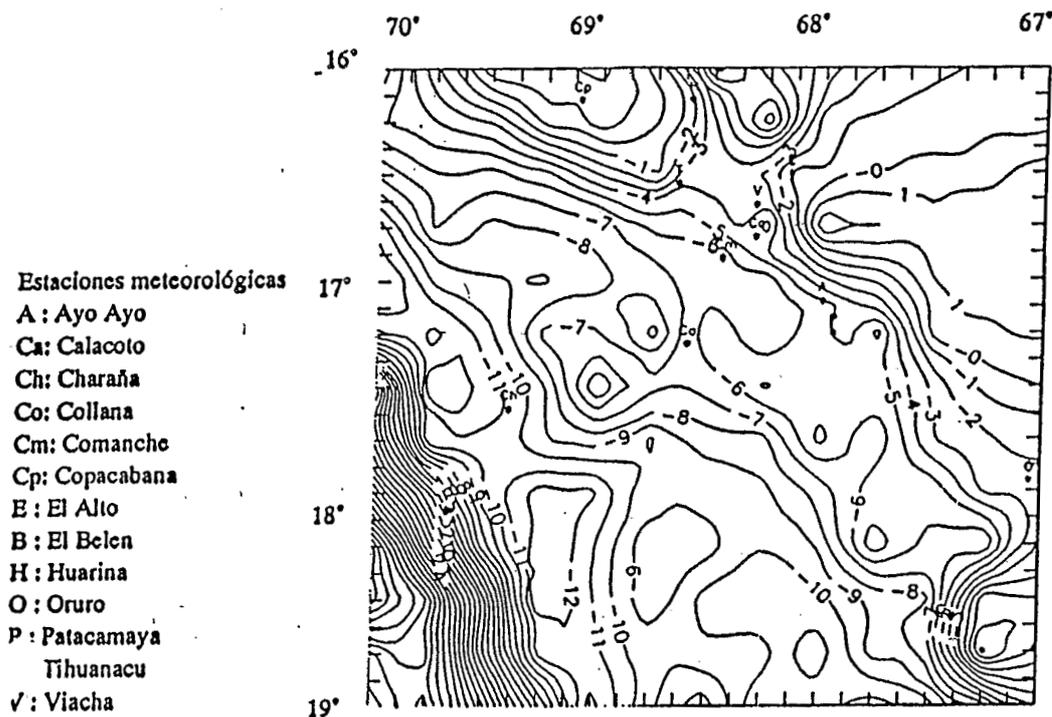
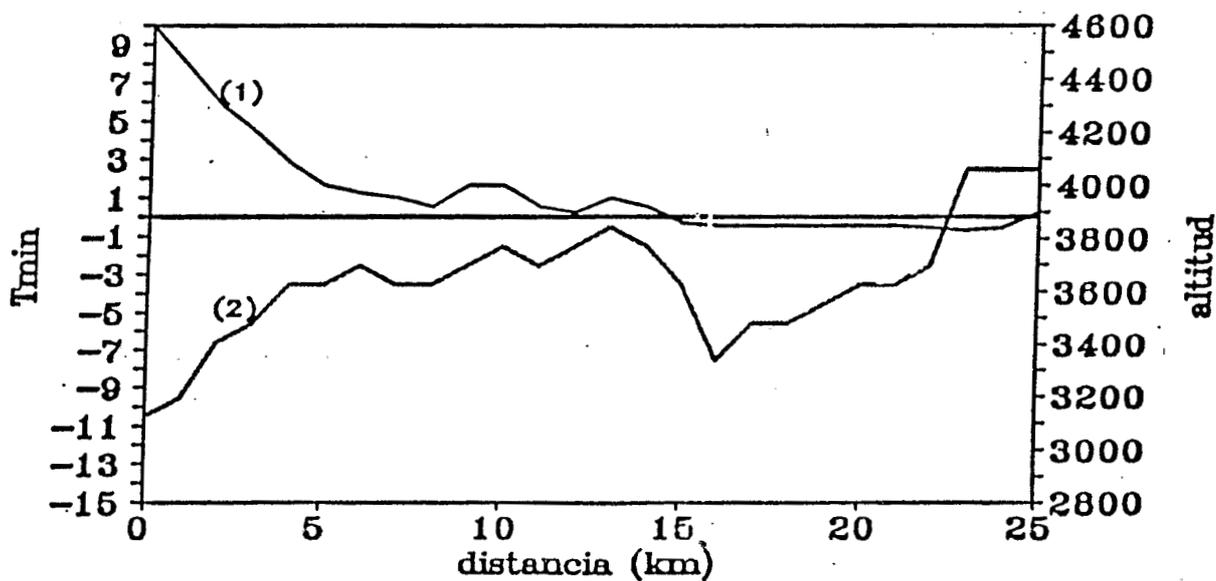


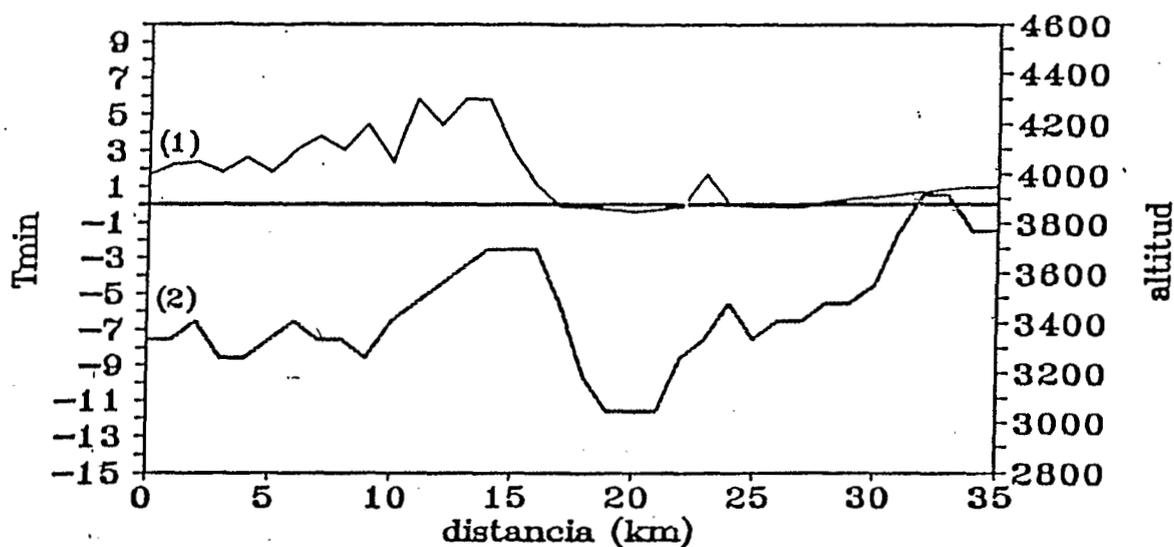
Fig. 4: Zonificación de las Tmin sobre el Altiplano a partir de las 7 imágenes de noche.

Para analizar la heterogeneidad local de las heladas, se realizó un mapa de Ts a una escala más grande (1/250 000) para la zona de Viacha. La relación entre la Tmin y el relieve aparece muy nítidamente, como lo muestran las figuras 5 y 6.

Los relieves son fríos cuando son superiores a 4200 m. Abajo de esta altura, las laderas son mucho más calientes que las zonas de pie de ladera, el efecto de la altura es aquí inverso: Estos resultados son de acuerdo a los encontrados por el análisis local de los riesgos de helada.



(1) altura (2) Tmin
Fig. 5: Repartición de Tmin en función del relieve:
Corte Norte, Viacha.



(1) altura (2) Tmin
 Fig. 6: Repartición de Tmin en función del relieve:
 Corte Sur, Viacha

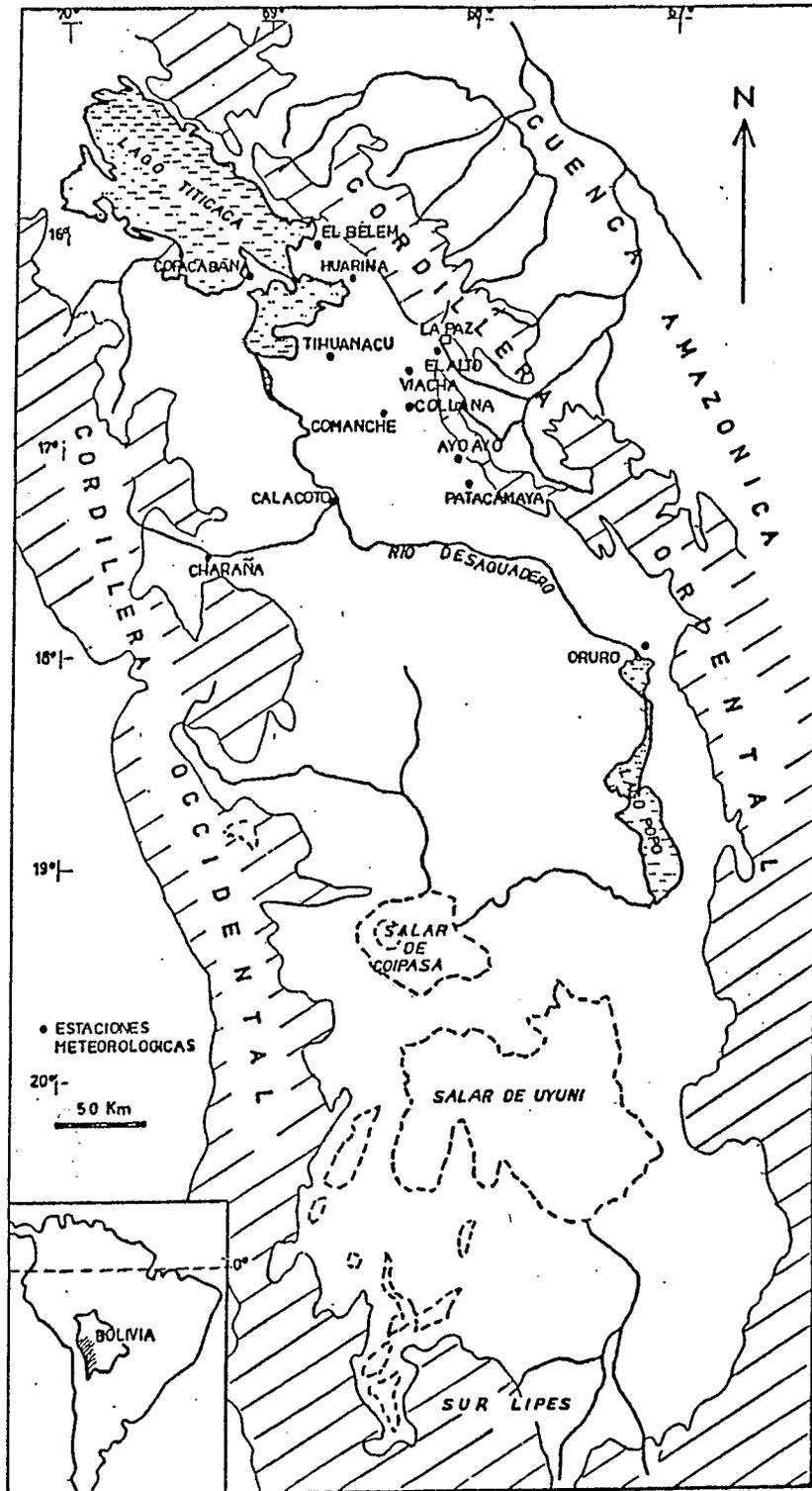
V. CONCLUSION

Los resultados obtenidos mostraron la importancia, la intensidad y la variación espacial de los riesgos de helada para la agricultura del Altiplano boliviano. La amplitud de la variación local de las temperaturas mínimas, debido principalmente al relieve y al suelo, permite al agricultor dispersar los riesgos de heladas. Esta heterogeneidad local, así como la insuficiente red meteorológica, impiden una zonificación precisa de las heladas a partir de los datos de las estaciones meteorológicas. El uso de la información de las imágenes infrarrojas nocturnas del satélite NOAA han permitido realizar una primera zonificación de las heladas. El mejoramiento de ésta pasa por una determinación más precisa de las relaciones entre T_s y T_{min} . La obtención de nuevas imágenes nocturnas NOAA, así como las imágenes diurnas, correspondiente al índice de vegetación, permitirán una discriminación más exacta entre las zonas frías y las zonas más calientes. Las T_s del satélite NOAA podrían ser precisadas tomando en cuenta el ángulo de "viseo" con referencia a las superficies captadas, no siendo menor este efecto en zona de relieve (Lagouarde et al., 1983), y utilizando la información de variables meteorológicas como la amplitud térmica ($T_{max} - T_{min}$) que entra en numerosos modelos para caracterizar la inercia térmica del complejo suelo-vegetación (Caselles et al., 1983).

VI. BIBLIOGRAFIA

- BOOTSMA A., 1976. Estimating minimum temperature and climatological freeze risk in hilly terrain *Agric. Meteorol.*, 16, 42, 425-443.
- CASELLES V., GANDIA V., MELIA J., 1983. Application des mesures de l'infrarouge thermique à la prévision des gelées sur les agrumes. *In Colloque International sur les signatures spectrales d'objets en télédétection, Bordeaux (France)*, 12-16 sept. 1983, 6 p.
- DE THUY E., GUIRLET C., 1988. Stratégies paysannes face au risque climatique. *ORSTOM, Agroclimatología del Altiplano Boliviano*, 9-60 p. La Paz-Bolivia.

- GUILLOT B., 1981. Les satellittes de l'environement. Description sommaire de la série TIROS - /NOAA-A.1. ORSTOM, *Initiations-Documetations techniques* 50-58 p.
- GUYOT G., SEGUIN B., 1988. Possibilités d'utilisation de la télédétection satellitaire en agrométéorologie. *Agronomie*, 1988, 8 (1), 1-13.
- HAGOLLE O., 1991. Chaîne de traitement CNES des images AVHRR-NOAA. Campagnes 1988-1989-1990. Manuel de l'utilisateur. CNES note 91.006,22 p.
- HOCEVAR A., y MARTSOLF J.D., 1971. Temperature distribution under radiation frost condition in a Central Pensylvania valley. *Agric. Meteorol.* 8. 371-383.
- LAGOUARDE J.P., VALERY P., BELLUOMO P., SOULIER M.A., 1983. Cartographie des topoclimats forestiers. Mise au point d'une méthodologie d'analyse de l'effet du relief sur les thermographies: application aux données HCMM sur le nord-est du Massif Central. *Agronomie*, 1983, 3 (10), 1011-1018.
- LAUGHLIN G.P. y KALMA J.D., 1987. Frost hazard assesment from local weather and terrain data. *Agric. Meteorol.* 40, 1-16.
- LE TACON Ph., 1989. Manifestation des risques climatiques à échelle de l'exploitation agricole, conséquences sur les pratiques paysannes - cas de l'altiplano bolivien. Mémoire d'étude ENSSAA, CNEARC, Dijon, France, 130 p.
- LE TACON Ph., VACHER J.J., ELDIN M., IMAÑA E., 1992. Los riesgos de helada en la Altiplano Boliviano. VII° Congreso Internacional sobre los cultivos andinos - La Paz - Bolivia, 287-292.
- LI P. y PALTA J.P., 1978. Frost hartening and freezing stress in tuber-bearing *Solanum* species. In: LI y SAKAI (ats). *Plant Cold Hardiness and Freezing Stress*. New York, U.S.A., 49-71.
- VENTSKEVICH G. Z., 1958. *Agrometeorology*. Translated from russian by the Israel Program for Scientific National Science Foundation OTS 60-51044, 1961.



Anexo 1: Mapa de las estaciones meteorológicas estudiadas en el Altiplano boliviano.