ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

FACOLTA' DI SCIENZE MATEMATICHE, FISICHE E NATURALI

Corso di laurea in Fisica dell'Atmosfera e Meteorologia

INSEMINAZIONE DELLE NUBI: STATO DELLA RICERCA E PROSPETTIVE OPERATIVE

Tesi di laurea di: Relatore:

Alberto Gasparini Prof. Vincenzo Levizzani

Sessione III

Anno Accademico 2008-2009

INDICE

1.	Int	roduzione	1				
2.	Cei	nni di microfisica delle nubi	2				
2	2.1	Microstruttura delle nubi cumuliformi	2				
2	2.2 Nubi continentali e nubi marittime						
2	2.3	Aerosol e nuclei di condensazione atmosferici	5				
2	2.4 Nucleazione omogenea ed eterogenea						
2	2.5 Nubi fredde e nucleazione del ghiaccio						
3.		eminazione artificiale di nubi per l'aumento azione	della 15				
3	3.1	Inseminazione glaciogena	16				
	3.1.	Inseminazione glaciogena statica	17				
	3.1.	2 Inseminazione glaciogena dinamica	18				
3	3.2	Inseminazione igroscopica	21				
4.	Gli	esperimenti israeliani	24				
4	l .1	Il primo esperimento israeliano: ISRAEL-1	25				
	4.1.	1 Aspetti operativi	25				
	4.1.	2 Principali risultati statistici	26				
	4.1.	Analisi statistiche successive e controversie	27				
	4.1.	4 Analisi operative successive e controversie	30				
	4.1.	5 Critiche riguardanti la climatologia della precipitazione in					
		Israele	32				
	4.1.	6 Critiche riguardanti la microstruttura delle nubi in Israele	33				

4.2	Il sec	condo esperimento israeliano: ISRAEL-2	37
2	4.2.1	Aspetti operativi	37
2	1.2.2	Principali risultati statistici	39
2	1.2.3	Critiche e controversie	41
2	1.2.4	L'esperimento operazionale Israel-3 e nuove analisi	41
5. (Gli espe	erimenti nel resto del mondo	48
5.1	Espe	rimenti con inseminazione glaciogena statica	49
4	5.1.1	Spagna: l'esperimento WMO PEP	49
4	5.1.2	Italia: l'esperimento Puglia	49
5.2	Espe	rimenti con inseminazione glaciogena dinamica	50
4	5.2.1	L'esperimento dei Caraibi	50
4	5.2.2	Gli esperimenti della Florida	50
4	5.2.3	L'esperimento del Texas	53
4	5.2.4	L'esperimento Cubano	54
4	5.2.5	L'esperimento thailandese	55
5.3	Espe	rimenti con inseminazione igroscopica	58
4	5.3.1	L'esperimento del Sudafrica	58
4	5.3.2	L'esperimento del Messico	60
4	5.3.3	L'esperimento della Thailandia	61
4	5.3.4	L'esperimento dell'India	62
6. Co	nclusio	ni, problemi aperti e prospettive operative	63
Riblia	norafia		66

CAPITOLO 1

INTRODUZIONE

Risolvere il problema della siccità, questo è stato sicuramente uno dei motivi per cui oltre cinquant'anni fa si sono iniziate a studiare e sperimentare le tecniche di inseminazione artificiale delle nubi per aumentare la precipitazione.

Nei paesi aridi, dove ci sono prolungate stagioni senza pioggia, e dove la mancanza d'acqua può essere una questione di vitale importanza, una tecnica affidabile e provata per poter provocare pioggia in nubi che normalmente non avrebbero sviluppato alcuna o scarsa precipitazione, sarebbe una scoperta di fondamentale rilevanza dal punto di vista scientifico, ma, soprattutto, economico. Molti paesi in tutto il mondo stanno tentando di entrare in possesso di tecniche di "weather modification", così vengono genericamente e comunemente indicate, le cui applicazioni possono essere le più svariate e coinvolgere fenomeni di diversa portata meteorologica.

Per esempio, gli Stati Uniti, già nel 1947 con il progetto Cirrus, quando le basi scientifiche dell'inseminazione delle nubi erano stata da poco scoperte, tentarono di alterare la potenza e la direzione di un uragano rilasciando ghiaccio secco sulle nubi; purtroppo, l'uragano passò sulla terraferma e la popolazione diede la colpa di questo all'inseminazione effettuata, intentando una causa contro il progetto e facendolo bloccare. Ci vollero undici anni per ricominciare le ricerche e nel 1962 partì il progetto Stormfury, sempre con l'obbiettivo di indebolire gli uragani atlantici, questa volta tramite inseminazione di ioduro d'argento, che durò fino al 1983 senza dare risultati di nessun genere.

Un altro esempio molto più recente è quello della Cina, probabilmente la nazione che fa più largo uso di queste tecniche, che prima delle olimpiadi di Pechino 2008 inseminò su larga scala le nubi per liberare l'aria dall'inquinamento ed evitare che la pioggia disturbasse la manifestazione.

Attorno a questi esperimenti ha spesso alleggiato un'aura di mistero, come sempre succede quando si cerca di intervenire sui processi naturali, e ciò ha dato modo ad una folta schiera di persone di immaginare e mettere in giro voci di oscure cospirazioni da parte delle grandi potenze mondiali per poter utilizzare il controllo meteorologico o, peggio, climatico come un'arma tout court.

Ovviamente molto si fa ma poco si sa, e il più delle volte, queste tecniche sono usate per scopi molto più utili e pacifici, come la diminuzione delle dimensioni della grandine e dell'intensità delle grandinate, ma soprattutto, per l'aumento della precipitazione. Lo scopo principale dell'inseminazione artificiale delle nubi, oggetto e tema di questa tesi, rimane infatti proprio quello di aumentare o, perlomeno, favorire la formazione della precipitazione in nube.

Il materiale di studio esaminato ed esposto in maniera ragionata nel seguito proviene da articoli scientifici relativi ad esperimenti svolti dagli anni sessanta ad oggi in tutte le parti del mondo, con una particolare attenzione rivolta alle sperimentazioni israeliane, considerate per anni le più affidabili e meglio scientificamente basate.

Nel secondo capitolo verranno richiamati alcuni concetti di microfisica delle nubi riguardanti la loro microstruttura e la formazione delle goccioline d'acqua e dei cristalli di ghiaccio che stanno alla base delle tecniche di inseminazione artificiale delle nubi.

Nel terzo capitolo saranno analizzati ed esposti i due principali modi di inseminazione: quella glaciogena e quella igroscopica.

Il quarto capitolo è dedicato agli esperimenti di inseminazione avvenuti in Israele e al vasto ed aspro dibattito scientifico che hanno innescato e che ancora oggi continua.

Infine, nel quinto capitolo, verrà dato uno sguardo ai maggiori esperimenti eseguiti nel resto del mondo cercando di valutare i principali successi ottenuti, i fallimenti e le valutazioni critiche fatte anche a distanza di anni.

Infine, nelle conclusioni, verrà tentata una breve sintesi e tracciato un bilancio dello stato di avanzamento della ricerca e della sperimentazione in questo campo.

CAPITOLO 2

CENNI DI MICROFISICA DELLE NUBI

L'inseminazione delle nubi è una tecnica che coinvolge un sistema nuvoloso a varie scale spazio-temporali: dalla microstruttura delle nubi alla dinamica dei grandi sistemi temporaleschi.

In questo capitolo saranno esposte alcune basilari caratteristiche microstrutturali delle nubi cumuliformi convettive, i principali "bersagli" dell'inseminazione, ed alcune nozioni base per poter comprendere il processo di formazione delle goccioline in nube e dei cristalli di ghiaccio, processi fondamentali alla base delle tecniche di inseminazione glaciogena ed igroscopica (Levizzani 2010; Giuliacci et al. 2005).

2.1 Microstruttura delle nubi cumuliformi

Le nubi a cui è applicata la tecnica dell'inseminazione sono principalmente cumuli, nubi originate da convezione in aria instabile le cui dimensioni orizzontali e verticali sono comparabili e in cui l'estensione verticale è controllata dalla profondità dello strato instabile e dal suo grado di instabilità.

Se le correnti convettive sono abbastanza veloci, allora si può formare un temporale convettivo, formato da più "celle", ognuna con un suo caratteristico ciclo vitale. All'interno di un temporale normalmente si trovano celle a diversi stadi di sviluppo ed i valori misurati della velocità dell'updraft, della temperatura e del contenuto di acqua liquida variano anche sulla distanza di alcuni metri.

La microstruttura delle nubi è controllata da fattori come: la temperatura alla base della nube, il tipo e la concentrazione dei nuclei di condensazione e ghiacciamento, la stratificazione di temperatura ed umidità e l'ammontare della forzatura (forcing) dinamica causata dalla variazione (shear) verticale del vento e dalla convergenza a grande scala. Le tecniche più affidabili per la misurazione di questi parametri rimangono quelle eseguite direttamente nella nube tramite aerei che effettuano penetrazioni nella nube a diverse altezze.

In un esperimento eseguito negli anni settanta in un cumulo nel Montana si sono misurate le principali caratteristiche della nube tramite penetrazioni trasversali e si è visto che:

- solitamente un alto contenuto di acqua liquida è associato ad updrafts vigorosi e solitamente cresce al crescere dell'altezza;
- i downdrafts esistono su distanze significative all'interno della traiettoria dell'aereo e sono particolarmente pronunciati vicino al bordo della nube;
- la turbolenza, normalmente rappresentata come il flusso di energia da eddies a grande scala fino a eddies a piccola scala, si intensifica con il crescere dell'altitudine;
- lo spettro delle goccioline si sposta verso dimensioni più elevate al crescere dell'altezza dalla base della nube suggerendo che le goccioline in salita possono essere entrate in collisione ed essersi unite (coalescenza) per formare gocce più grandi.

Nelle nubi cumuliformi in formazione solitamente le temperature e i contenuti d'acqua sono più bassi dei loro livelli adiabatici; questo si pensa avvenga a causa di qualche tipo di mescolamento e diluizione che ha luogo al loro interno.

La spiegazione considerata più attendibile è che l'aria, trascinata all'interno attraverso i fianchi esterni della nube, si mescoli vicino alla sua sommità e, raffreddandosi, riscende sotto forma di downdraft penetranti che provocano questa diluizione.

2.2 Nubi continentali e nubi marittime

Gli spettri dimensionali delle goccioline di nube sono caratterizzati da una funzione, la distribuzione dimensionale, n(r), definita in modo tale che n(r)dr è il numero di goccioline per unità di volume nell'intervallo di raggi (r, r+dr).

Solitamente questa funzione n(r) cresce rapidamente da valori minimi a valori massimi calando con le dimensioni crescenti delle goccioline, creando quindi una distribuzione asimmetrica con una coda lunga verso le dimensioni maggiori.

Si è visto che gli spettri dimensionali delle nubi cumuliformi continentali sono molto differenti da quelli di nubi marittime: come si vede dalla Fig.2.1, i primi di solito presentano una grande concentrazione di piccole goccioline ed uno spettro molto stretto, mentre i secondi hanno una concentrazione relativamente piccola di grandi gocce ed uno spettro più largo.

In questi due tipi di nubi, però, il contenuto di acqua liquida risulta essere molto simile; la differenza negli spettri dimensionali quindi può essere spiegata sulla base dei diversi tipi di masse d'aria in cui le goccioline si formano, e che sono

caratterizzati da diverse concentrazioni e tipi di nuclei di condensazione. Solitamente l'aria sopra i continenti ha una quantità molto più elevata di nuclei di condensazione rispetto a quella sopra gli oceani; su tali nuclei "continentali" si possono formare le goccioline che di conseguenza sono più piccole a parità di contenuto totale d'acqua della nube.

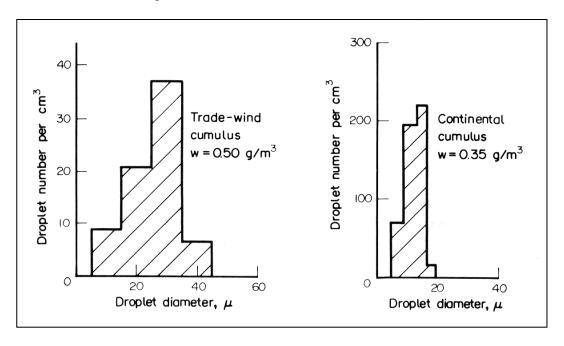


Figura 2.1: Spettri di goccioline in cumuli marittimi (sinistra) e continentali (destra).

Si è visto anche che le nubi continentali devono essere molto più estese verticalmente di quelle marittime per avere la stessa probabilità di produrre precipitazione: poiché nelle nubi marittime le goccioline sono relativamente poche e grandi, esse possono più facilmente collidere tra loro e subire la coalescenza rispetto alle goccioline piccole presenti in quelle continentali.

2.3 Aerosol e nuclei di condensazione atmosferici

Come si è visto la principale differenza fra nubi continentali e marittime sta nella diversa composizione aerosolica delle masse d'aria sopra gli oceani e sopra i continenti.

Il particolato atmosferico (aerosol) è l'insieme delle particelle solide (polveri) o in fase mista che si trovano in sospensione nella bassa atmosfera; sono costituiti

prevalentemente da particelle di sale marino, polveri (soprattutto silicati), solfati, nitrati, sostanze organiche e fumi.

Le particelle che si formano per condensazione sono solitamente sferiche, le altre possono essere cristalli, fibre, agglomerati o frammenti irregolari.

Per praticità sono descritte in termini di diametro sferico equivalente D, definito come il diametro di una sfera avente lo stesso volume della particella di aerosol.

In base alle loro dimensioni, gli aerosol vengono classificati in tre gruppi:

- nuclei di Aitken: $10^{-3} \mu m < D < 0.2 \mu m$ c (concentrazione) = 10^4 cm^{-3}
- nuclei grandi: $0.2~\mu m < D < 2~\mu m$ $c = 10~cm^{-3}$
- nuclei giganti: $D > 2 \mu m$ $c = 1 cm^{-3}$

Le concentrazioni di aerosol sono altamente variabili nel tempo e nello spazio e sono più alte vicino al suolo e nelle vicinanze delle sorgenti, come città, siti industriali, incendi o vulcani attivi. In Figura 2.2 è mostrata la distribuzione dimensionale delle particelle di aerosol a seconda del tipo e della loro provenienza.

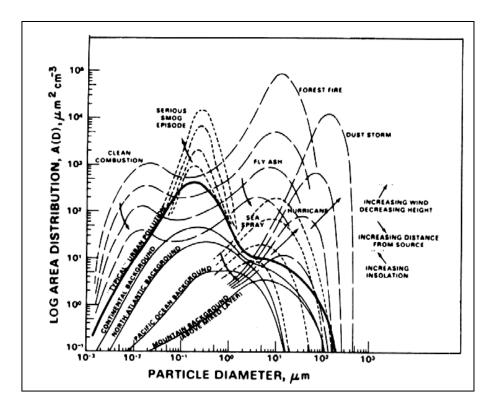


Figura 2.2: Distribuzione dimensionale degli aerosol a livello del suolo.

Le particelle che sono ritenute più importanti per la formazione di nubi naturali sono quelle "grandi" poiché particelle più piccole di 0.1 µm richiederebbero per

essere attivate rapporti di saturazione più elevati di quelli che esistono in atmosfera; particelle invece più grandi di 4 o 5 µm possono anche agire come nuclei di condensazione per alcune goccioline di nube molto più grandi del normale, ma sono molto meno numerose.

È possibile effettuare una classificazione in base alla temperatura di attivazione dei nuclei igroscopici:

- nuclei di condensazione: sono quelli attivati a temperature maggiori dello zero termico che favoriscono la formazione di goccioline in seguito alla condensazione del vapore acqueo;
- nuclei glaciogeni: sono quelli attivati a temperature inferiori allo zero che agevolano la formazione di cristalli di ghiaccio. Se la formazione avviene a partire dal congelamento di goccioline d'acqua sopraffuse, (cioè che rimangono liquide anche al di sotto di 0°C) i nuclei glaciogeni sono detti di ghiacciamento, mentre nel caso di formazione di cristalli direttamente dalla sublimazione del vapore acqueo i nuclei glaciogeni sono detti di sublimazione.

Il processo di formazione della goccioline a partire dalla condensazione del vapore sui nuclei igroscopici è chiamato *nucleazione eterogenea*. La formazione di goccioline da semplice condensazione del vapore in presenza di elevati valori di sovra saturazione o di temperature fortemente negative è chiamata invece *nucleazione omogenea*.

2.4 Nucleazione omogenea ed eterogenea

Nella nucleazione omogenea la velocità di crescita di una gocciolina dipende dalla pressione parziale del vapore acqueo nelle sue vicinanze, poiché questa determina il tasso a cui le molecole di vapore collidono con la gocciolina. L'evaporazione invece dipende sensibilmente dalla temperatura e quando si arriva ad un equilibrio tra il liquido ed il vapore, cioè quando il tasso di evaporazione è uguale a quello di condensazione, allora la pressione di vapore è detta di saturazione. La pressione di vapore di saturazione e_s sulla superficie di una gocciolina sferica di raggio r con tensione superficiale σ (che può essere definita come il lavoro per unità d'area richiesto per ampliare la superficie del liquido) e densità ρ_L alla temperatura T è data da:

$$e_s = e_s \left(\infty\right) \cdot e^{(2\sigma/rR_v \rho_L T)}$$

dove R_v è la costante dei gas per il vapore acqueo ed $e_s(\infty)$ è la pressione di vapore di saturazione su di una massa d'acqua.

Il tasso di crescita di una gocciolina di raggio r è proporzionale alla differenza fra $e_s(r)$ ed e, la pressione di vapore dell'ambiente. Se esse sono tali che e- $e_s(r) < 0$, allora la gocciolina tenderà a crescere.

Il raggio critico r_c che deve essere superato affinché una gocciolina formata per collisione casuale di molecole d'acqua sia stabile, è definito come il raggio per il quale e- $e_s(r) = 0$ ed è dato da:

$$r_c = \frac{2\sigma}{R_v \rho_L T \ln S}$$

dove $S = e/e_s(\infty)$ è il rapporto di saturazione.

Nella nucleazione omogenea le goccioline di dimensioni critiche si formano per collisione casuale di molecole d'acqua; se queste catturano altre molecole allora diventano "supercritiche", cioè, per dimensioni crescenti, $e_s(r)$ decresce e il tasso di crescita aumenta. Il tasso di nucleazione J è il tasso a cui goccioline supercritiche (che poi crescono quindi in maniera spontanea) si formano ed è dato dal prodotto fra la concentrazione di goccioline critiche e il tasso a cui una gocciolina critica ingloba un'altra molecola e diviene supercritica.

Per convenzione, la soglia che definisce un tasso significativo di nucleazione omogenea è circa $J=1~{\rm cm}^{-3}~{\rm s}^{-1}$ e il valore di S corrispondente a questo tasso è detto rapporto di saturazione critico S_c . Da esperimenti si è visto che S_c diminuisce al crescere della temperatura con valori di circa 4.3 a 273 K, 6.3 a 250 K, e 3.5 a 290 K. Questi valori così elevati del rapporto di saturazione non sono mai osservati in atmosfera dove la sovrassaturazione eccede raramente l'1-2%.

In condizioni normali quindi la nucleazione omogenea non è possibile e serve che le goccioline si formino sui nuclei di condensazione igroscopici.

I nuclei di condensazione igroscopici sono quelli con un'alta affinità per l'acqua; altri possono essere neutri, che richiedono cioè una sovrassaturazione simile a quella della nucleazione omogenea, o idrofobici, che richiedono sovrassaturazioni ancora più elevate.

La nucleazione eterogenea avviene perché quando si aggiunge soluto al liquido, alcune delle molecole che si trovano inglobate nello strato superficiale sono rimpiazzate da molecole di soluto e, se la pressione di vapore del soluto è inferiore a quella del solvente, allora la pressione di vapore viene ridotta in proporzione alla quantità di soluto presente. Il risultato è che una gocciolina di soluzione può essere in equilibrio con l'ambiente ad una sovrassaturazione molto più piccola di quella di una gocciolina di acqua pura delle stesse dimensioni.

Per una gocciolina di soluzione, la riduzione della pressione di vapore dovuta alla presenza di un soluto non volatile è data dalla *Legge di Köhler*:

$$\frac{e_s'(r)}{e_s(\infty)} = 1 + \frac{a}{r} - \frac{b}{r^3}$$

dove:

- $e_s(r)$ è la pressione di vapore di saturazione di una gocciolina di soluzione,
- a/r è il "termine di curvatura" che esprime la crescita del rapporto di saturazione su una gocciolina rispetto ad una superficie piana,
- b/r³ è il "termine di soluzione" che esprime la riduzione della pressione di vapore dovuta alla presenza della sostanza dissolta.

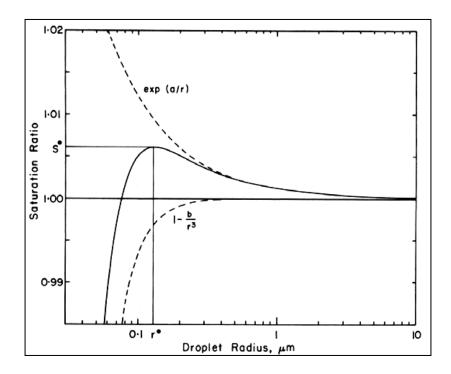


Figura 2.3: Curva di Köhler per una gocciolina di soluzione formatasi su un nucleo di condensazione di solfato di ammonio di massa 10^{-16} g.

Da questa equazione si ricavano le curve di Köhler (Fig.2.3) per i vari materiali da cui si può vedere che l'umidità ambientale cresce, facendo crescere la gocciolina,

finché non si arriva al rapporto di saturazione critico S^* (corrispondente al picco della funzione di Köhler). Una volta superato questo valore S^* , e raggiunto quindi il raggio critico r^* , il vapore diffonderà verso la gocciolina che continuerà a crescere oltre r^* senza aver bisogno che il rapporto di saturazione ambientale cresca allo stesso tempo.

Oltre il valore r^{*} la gocciolina è instabile e ogni variazione di S causerà la crescita o l'evaporazione, ma comunque una deviazione dalle sue dimensioni di equilibrio. Quando una gocciolina ha dimensioni più piccole di r^{*} e si trova in equilibrio stabile, è chiamata particella di haze. Un nucleo di condensazione si dice "attivato" quando le goccioline che si formano intorno ad esso raggiungono le dimensioni r^{*}.

Nelle nubi reali la crescita non continua all'infinito poiché ci sono moltissime goccioline che competono per il vapore disponibile e tendono a diminuire il valore di S una volta che la condensazione diviene più rapida della produzione della sovrassaturazione.

La situazione appena descritta è quella che si verifica nelle cosiddette "nubi calde", cioè quelle nubi che si trovano completamente al di sotto dell'isoterma di 0°C. Una nube di questo genere è costituita solamente da goccioline di acqua liquida e il meccanismo per la loro crescita fino a dimensioni precipitanti è appunto quello della iniziale condensazione su nuclei igroscopici e in seguito della collisione e coalescenza.

Se invece la nube si estende al di sopra dell'isoterma di 0°C, allora avremo anche la comparsa di cristalli di ghiaccio e la nube sarà chiamata "nube fredda".

2.5 Nubi fredde e nucleazione del ghiaccio

I cristalli di ghiaccio possono formarsi grazie a cinque diversi meccanismi di nucleazione (si veda la Fig.2.4), che può essere omogenea o eterogenea:

- per il congelamento spontaneo di una gocciolina di acqua pura;
- per la deposizione e la sublimazione del vapore sui nuclei glaciogeni;
- per il congelamento di una goccia d'acqua sopraffusa formatasi dalla condensazione del vapore sui nuclei glaciogeni;
- per il contatto tra un nucleo glaciogeno e una goccia d'acqua sopraffusa: il contatto da origine al congelamento e alla formazione del cristallo;

• per il congelamento di una goccia d'acqua sopraffusa in seguito all'immersione di un nucleo glaciogeno nella goccia stessa.

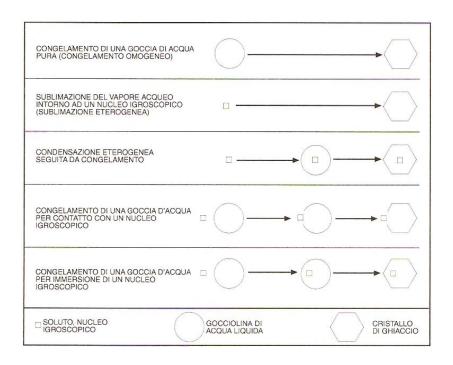


Figura 2.4: I diversi tipi di formazione dei cristalli di ghiaccio.

Un cristallo di ghiaccio che si è appena formato in una nube di goccioline d'acqua è in un ambiente favorevole per crescere rapidamente per diffusione. L'ambiente di nube, infatti, è saturo rispetto all'acqua liquida e quindi sovrassaturo rispetto al ghiaccio.

Il ghiacciamento omogeneo di una gocciolina di acqua pura avviene quando l'organizzazione molecolare dell'acqua produce una struttura stabile simile a quella del ghiaccio che può servire come nucleo di ghiacciamento. Perché ciò accada occorre che la temperatura sia di circa -40°C (quindi in condizione di forte sopraffusione e sovrasaturazione) per goccioline con raggio inferiore ai 5 µm; per raggi maggiori la temperatura per il ghiacciamento spontaneo è leggermente più elevata. Naturalmente la nucleazione omogenea del ghiaccio non può avvenire in atmosfera, dove non si trovano mai le necessarie sovrassaturazioni. Un caso particolare, l'unico, in cui il ghiacciamento omogeneo può avvenire è costituito dai cirri d'alta quota.

I cristalli di ghiaccio normalmente appaiono in una nube in un numero apprezzabile quando la temperatura scende sotto i -15°C, temperatura che

demarca la soglia della nucleazione eterogenea. Questa può avvenire a livelli di sovrassaturazione e sovraraffreddamento minori di quelli richiesti per la nucleazione omogenea perché il materiale estraneo permette alle molecole d'acqua di avere una superficie o un substrato su cui potersi legare e formare delle strutture di tipo ghiaccio.

La probabilità della nucleazione eterogenea dipende molto dalle proprietà del materiale di cui è costituito il substrato e sarà maggiore se la struttura cristallina di questo substrato assomiglia a quella di una superficie di ghiaccio.

	Crystal lattice dimension		Temperature	3 3	
Substance	a axis (Å)	caxis(Å)	to nucleate ice (°C)	Comments	
Pure substances					
Ice	4.52	7.36	0		
AgI	4.58	7.49	-4	Insoluble	
PbI_2	4.54	6.86	-6	Slightly soluble	
CuS	3.80	16.43	-7	Insoluble	
CuO	4.65	5.11	-7	Insoluble	
HgI_2	4.36	12.34	-8	Insoluble	
Ag_2S	4.20	9.50	-8	Insoluble	
CdI_2	4.24	6.84	-12	Soluble	
I_2	4.78	9.77	-12	Soluble	
Minerals					
Vaterite	4.12	8.56	-7		
Kaolinite	5.16	7.38	- 9	(Silicate)	
Volcanic ash	-		-13		
Halloysite	5.16	10.1	-13		
Vermiculite	5.34	28.9	-15		
Cinnabar	4.14	9.49	-16		
Organic materials					
Testosterone	14.73	11.01	-2		
Chloresterol	14.0	37.8	$-2 \\ -2$		
Metaldehyde			-5		
β -Naphthol	8.09	17.8	-8.5		
Phloroglucinol		_	-9.4		
Bacterium			-2.6	(Bacteria in leaf mold)	
Pseudomonas				,	
Syringae					

Figura 2.6: Temperatura a cui diverse sostanze nucleano il ghiaccio.

Dopo vari esperimenti per stabilire il potere nucleante delle diverse sostanze (Fig.2.6) si è visto che il materiale che si avvicina di più alla struttura del ghiaccio è lo *ioduro d'argento (AgI)* che ha anche una temperatura di nucleazione

relativamente alta. Per questo l'AgI è la sostanza in assoluto più usata per gli esperimenti di inseminazione glaciogena.

Il contenuto dei nuclei di ghiacciamento in aria varia molto: una concentrazione tipica è di 1 l⁻¹ alla temperatura di -20°C, in crescita di un fattore dieci per ogni 4°C di ulteriore raffreddamento.

Il ghiaccio di solito si trova più facilmente in cumuli in decadimento ed è più comune in nubi stratiformi che in nubi cumuliformi con la stessa temperatura alla sommità, temperatura che deve essere solitamente di almeno -5°C o inferiore perché ci sia la presenza del ghiaccio.

Un problema che si presenta è che c'è una grossa discrepanza fra le concentrazioni di cristalli di ghiaccio nelle nubi e le concentrazioni di nuclei di ghiacciamento nell'aria. Una possibile spiegazione è che dopo che i primi cristalli si sono formati sui nuclei, altri se ne possono formare tramite processi secondari in cui i cristalli primari si frammentano. I principali processi secondari sono due: la frattura di cristalli di ghiaccio e la rottura delle gocce in ghiacciamento.

Un terzo meccanismo di moltiplicazione del ghiaccio è la produzione di particelle secondarie quando gocce sopraffuse delle dimensioni e temperature opportune sono catturate da graupel.

Poiché il vapore in nube è spesso in equilibrio con l'acqua e quindi sovrassaturo rispetto al ghiaccio, si suppone che parte della precipitazione che raggiunge il suolo sotto forma di drizzle o pioggia leggera si sia formata da cristalli non aggregati che si sono fusi prima di raggiungere il suolo.

Molti cumuli si sviluppano inizialmente a temperature superiori a 0°C, quindi in seguito crescono verticalmente permettendo di raggiungere temperature più basse ed in questo modo di formare cristalli di ghiaccio. A seconda della temperatura del top della nube, del contenuto d'acqua liquida e della concentrazione di goccioline si possono avere sia il processo di coalescenza fra goccioline che quello di formazione dei cristalli di ghiaccio.

In Fig.2.7 si può vedere la differenza tra il tempo che richiede un cristallo di ghiaccio in crescita per diffusione e il tempo per la crescita di una goccia per coalescenza per raggiungere la stessa massa.

Il cristallo cresce per diffusione in maniera più rapida della gocciolina, la cui crescita è rallentata dalla scarsa efficienza di cattura, fino a circa 30 minuti, quando la goccia raggiunge la massa del cristallo ad un raggio di circa 160 µm.

La precipitazione inizia ad avvenire quando le particelle hanno una massa di circa $4~\mu g$ (cioè per l'acqua un raggio di 0.01~mm) e, dipendendo dalla temperatura, dalla concentrazione d'acqua in nube e dalle dimensioni delle goccioline, può essere iniziata da entrambi i processi.

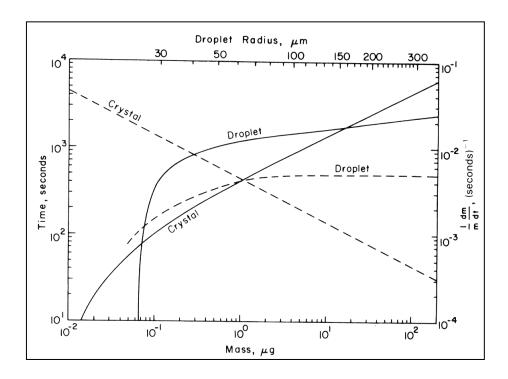


Figura 2.7: Tempi di crescita per un cristallo ed una gocciolina.

CAPITOLO 3

INSEMINAZIONE ARTIFICIALE DI NUBI PER L'AUMENTO DELLA PRECIPITAZIONE

L'inseminazione artificiale di nubi convettive è una tecnica sviluppata attorno agli anni 50 che prevede la dispersione nelle nubi di varie sostanze chimiche in modo da alterare i processi microfisici all'interno delle nubi stesse e, in questo modo, influenzare il tipo e la quantità di precipitazione.



Figura 3.1: Modalità di dispersione in nube delle sostanze tramite aereo.





Figura 3.2: Modalità di dispersione da terra delle sostanze tramite generatori e cannoni.

Le sostanze possono essere disperse direttamente nella nube attraverso degli aerei (Fig. 3.1) equipaggiati con dei "flares", sorta di razzi solitamente contenenti un'alta concentrazione di ioduro d'argento, che bruciando, polverizzano il materiale in maniera costante durante il volo, oppure da terra (Fig. 3.2), sparando

il materiale con cannoni antiaerei o attraverso generatori che disperdono la sostanza, sospinta poi verso l'alto dalle correnti d'aria ascendenti.

L'inseminazione delle nubi si divide principalmente in due tipi: l'inseminazione glaciocena e l'inseminazione igroscopica che possono essere a loro volta di tipo statico o di tipo dinamico.

Diversi lavori di review sull'argomento sono stati pubblicati. Tra gli altri, è opportuno segnalare quelli di Cotton (1982) sulle nubi calde, e quelli dello stesso Cotton (1997) e di Garstang et al. (2005) sul problema generale.

3.1 Inseminazione glaciogena

L'inseminazione glaciogena prevede l'iniezione di materiale in grado di indurre la formazione di ghiaccio in nubi sovraraffreddate per stimolare la produzione di precipitazione per crescita di cristalli di ghiaccio.

La tecnica fu sviluppata nel 1946 da Irving Langmuir e Vincent Schaefer (si veda Langmuir 1962), chimici e meteorologi americani che, cercando di creare nubi sovraraffreddate, usarono ghiaccio secco per abbassare la temperatura dell'aria, troppo alta perché potesse produrre una nube, e videro che le particelle di ghiaccio secco, agendo da nuclei di ghiacciamento, condensano il vapore acqueo presente e creano milioni di micro-cristalli di ghiaccio.

Successivamente Bernard Vonnegut (1971), trovò che lo ioduro d'argento (AgI), una sostanza con una struttura cristallina simile a quella del ghiaccio, aveva lo stesso potere.

Iniziarono così alcuni esperimenti per tentare di alterare la struttura delle nubi tramite queste due sostanze che, ancora oggi, sono le più usate negli esperimenti di inseminazione artificiale di nubi.

L'inseminazione glaciogena di nubi convettive per l'aumento della precipitazione si basa su due concetti: il primo, chiamato comunemente "inseminazione statica", si basa sulla supposizione che l'efficienza nella produzione di precipitazione da parte di alcune nubi, dove la pioggia si forma in maniera naturale da cristalli di ghiaccio, è fortemente limitata dalla scarsità di nuclei di ghiacciamento naturali e quindi può essere aumentata tramite l'inserimento di nuclei di ghiacciamento artificiali.

Il secondo concetto, chiamato "inseminazione dinamica", prevede che la conversione delle goccioline d'acqua sovraraffreddate in particelle di ghiaccio

indotta da parte dei nuclei artificiali, porti ad un aumento della precipitazione e all'intensificazione dei downdraft nelle celle inseminate, permettendo così alla nube di crescere in dimensioni, utilizzare più vapore acqueo, e quindi produrre più precipitazione di quella che avrebbe prodotto in maniera naturale.

3.1.1 Inseminazione glaciogena statica

L'obbiettivo principale del "modo statico" di inseminazione delle nubi è quello di aumentare l'efficienza di produzione di precipitazione introducendo in nubi sovraraffreddate una quantità di materiale in modo da ottenere una concentrazione ottimale di cristalli di ghiaccio.

Inizialmente si pensava che queste nubi fossero caratterizzate da una scarsa concentrazione di nuclei di ghiacciamento e che quindi l'iniezione in esse di una modesta quantità di nuclei artificiali da terra o alla base della nube avrebbe portato ad un sistema nuvoloso in grado di produrre maggiore precipitazione.

In realtà, Cotton e Pielke (1995) scoprirono dall'analisi degli esperimenti di inseminazione statica degli ultimi 50 anni che non tutte le nubi sono adatte all'inseminazione statica ed esistono alcune condizioni perché si possa avere un aumento della precipitazione:

- le nubi devono avere una base relativamente fredda ed essere di tipo continentale;
- il top della nube deve avere una temperatura compresa fra i -10°C e i -25°C;
- l'inseminazione deve avvenire all'interno di una finestra temporale che permetta di trovare nella nube una quantità significativa di acqua sovraraffreddata prima che sia rimossa attraverso processi di precipitazione naturale.

L'efficienza di questo metodo di inseminazione è quindi legata alla variabilità naturale delle nubi e può essere favorita o meno dal tipo di nube (più o meno continentale) e dal range di temperature in cui viene eseguito l'esperimento.

A causa di queste particolari condizioni e delle difficoltà tecniche nel rilevarle (nel luogo e al momento dell'esperimento) si può capire perché c'è una grossa differenza nei risultati fra gli esperimenti di inseminazione statica di nubi e perché un successo in una particolare zona non possa essere riprodotto da altre parti a

meno che non siano replicate le stesse condizioni ambientali e la stessa metodologia di inseminazione, cosa assai improbabile. È questa la difficoltà maggiore di ogni esperimento condotto in atmosfera e cioè la quasi totale mancanza di "riproducibilità" che complica moltissimo il trattamento statistico e la formulazione di adeguati modelli concettuali e fisici dei fenomeni.

L'evidenza maggiore dell'aumento della precipitazione dovuto ad inseminazione statica di nubi viene dai due esperimenti eseguiti in Israele a partire dagli anni 60 che sono sempre stati considerati i più evidenti successi nell'utilizzo di questa tecnica.

Come si vedrà in seguito questi esperimenti sono stati e sono tutt'ora oggetto di molte critiche e analisi che non hanno ancora chiarito del tutto i risultati ottenuti.

3.1.2 Inseminazione glaciogena dinamica

Il modello dinamico di inseminazione era basato all'inizio sul presupposto che una nube inseminata avrebbe prodotto una quantità di precipitazione simile ad una non inseminata della stessa altezza e che la quantità di precipitazione aumentava con il crescere della profondità della nube.

Così si era pensato che un'inseminazione massiva della parte sovraraffreddata della nube avrebbe ghiacciato l'acqua e il conseguente rilascio di calore latente avrebbe aumentato il galleggiamento della porzione inseminata permettendo alla nube di crescere in altezza e quindi di produrre più pioggia.

La principale differenza nell'implementazione del metodo dinamico sta nella maggiore quantità di materiale introdotto nella nube. Un buon risultato per il metodo statico è di raggiungere una concentrazione che va da 1 a 10 cristalli di ghiaccio per litro a temperature maggiori di -15°C; per il metodo dinamico l'obbiettivo è di raggiungere una concentrazione di cristalli di ghiaccio che va da 100 a 1000 per litro, che corrisponde ad un'inseminazione di una quantità da 200 a 1000 grammi di ioduro d'argento con razzi sganciati direttamente negli updraft dei cumuli dove si ritrova un adeguato *contenuto d'acqua liquida sovraraffreddata* (SLWC: Supercooled Liquid Water Content).

Questa metodologia venne testata per la prima volta negli esperimenti avvenuti nei Caraibi nel 1965 e nei due esperimenti nel sud della Florida nel 1968 (SF68) e nel 1970 (SF70) senza però riuscire ad ottenere evidenze statistiche di un aumento della precipitazione.

Un modello concettuale più dettagliato della tecnica venne formulato da Woodley et al. (1982) dopo l'analisi dei risultati del primo dei due "Florida Area Cumulus Experiment" (FACE-1) eseguito sempre nel sud della Florida fra il 1970 e il 1976. In questo modello l'inseminazione è ipotizzata produrre un rapido ghiacciamento del SLWC nell'updraft con il rilascio di calore latente che invigorisce l'updraft stesso e aumenta la crescita verticale del cumulo inseminato. La pressione cala al di sotto del cumulo in crescita a causa dell'accelerazione e del riscaldamento dei livelli sovrastanti ed è seguita da un maggior afflusso d'aria ai livelli medio-bassi che contribuisce in tal modo ad aumentare la crescita della nube. Alla fine questi processi porterebbero ad un aumento della precipitazione e ad un'intensificazione dei downdraft nella nube inseminata. L'aumento di convergenza all'interfaccia fra il flusso uscente del downdraft e il flusso dell'ambiente stimola la crescita di nubi nelle vicinanze, alcune delle quali potrebbero produrre pioggia. Quando l'inseminazione viene effettuata su torri con alcune celle nelle vicinanze, questa tende ad aggregarle creando così un cumolonembo pienamente sviluppato con un effetto netto di aumento della precipitazione nell'area bersaglio.

Questo nuovo modello venne però messo in dubbio dai risultati degli esperimenti svolti in Texas dal 1986 al 1994 che mostrarono che l'inseminazione non aumentò l'altezza delle celle convettive e che le nubi inseminate produssero più pioggia delle nubi non inseminate della stessa altezza.

Ciò portò ad un ripensamento del modello concettuale usato e alla creazione di quello di Rosenfeld e Woodley (1993) (Fig.3.3). Nel loro modello l'inseminazione è prevista produrre un rapido ghiacciamento del SLWC nell'updraft con il congelamento preferenziale delle gocce più grandi che poi causerebbero l'accretion del resto dell'acqua della nube in forma di graupel. Questa graupel indotta dall'inseminazione si suppone che cresca molto più velocemente delle gocce d'acqua con la stessa massa cosicché una grande frazione dell'acqua di nube è convertita in precipitazione prima di essere persa tramite altri processi. La crescita del ghiaccio non è vista come un fattore significativo finché la maggior parte dell'acqua di nube non è stata convertita in precipitazione.

Questa veloce conversione dell'acqua in precipitazione ghiacciata incrementa il rilascio di calore latente, aumenta il galleggiamento della nube, e invigorisce l'updraft che a sua volta supporta la crescita delle idrometeore di ghiaccio prodotte dall'inseminazione.

Il principio base del primo modello concettuale, che lega la precipitazione con la profondità della nube, viene sostituito con un nuovo concetto che collega il ritardo nella formazione dei downdraft indotti dalla precipitazione ad una maggiore ritenzione di acqua nella parte alta della nube dovuta all'intensificazione degli updraft indotti dall'inseminazione.

Questo ritardo permette agli updraft di portare all'interno della nube altra umidità che aumenta le dimensioni delle idrometeore.

In conclusione, si ha un aumento di precipitazione e un invigorimento dei downdraft nella nube inseminata, che porta ad una maggiore convergenza, alla conversione del sistema di nubi in un cumulonembo sviluppato e quindi ad un aumento netto della precipitazione nell'area bersaglio.

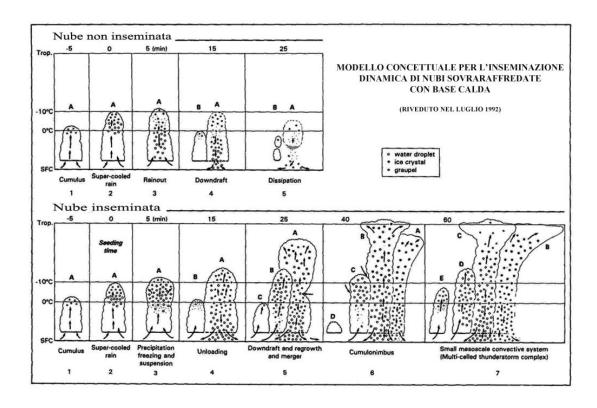


Figura 3.3: Illustrazione del modello concettuale per l'inseminazione dinamica di nubi sovraraffreddate con base calda (da Rosenfeld e Woodley 1993)

Anche questo modello venne confrontato con i risultati degli esperimenti svolti in Thailandia dal 1994 al 1998 senza però trovare una conferma definitiva.

In ogni caso Woodley e Rosenfeld conclusero che il collegamento fra profondità e precipitazione del primo modello è una conseguenza probabile, ma non imprescindibile, dell'intensificazione dell'updraft dovuta all'inseminazione.

Il concetto di inseminazione glaciogena dinamica è un'ipotesi plausibile che offre l'opportunità di aumentare la precipitazione in maniera molto più marcata rispetto all'inseminazione statica. È comunque un modello concettuale molto più complesso rispetto a quello statico che richiede una profonda comprensione del comportamento dei cumuli e della loro interazione sia reciproca, sia con i sistemi a più larga scala, e che dipende dai dettagli evolutivi della precipitazione.

Essendo una catena di eventi strettamente collegati l'uno all'altro, l'ipotesi è molto vulnerabile ed esposta anche ad un solo errore in ognuno dei collegamenti e, data la grande variabilità naturale dei sistemi convettivi, è molto raro che per un dato esperimento il modello concettuale venga rispettato puntualmente in tutti i suoi risvolti.

3.2 Inseminazione igroscopica

Il processo dominante per la formazione della precipitazione in nubi calde è la collisione e la coalescenza. Questo processo è molto efficiente in nubi di tipo marittimo con una base calda o in nubi caratterizzate da un notevole quantitativo di acqua liquida. Il processo di collisione e coalescenza fra le goccioline è molto importante anche in nubi miste poiché la presenza contemporanea di goccioline di drizzle sovraraffredate e gocce di pioggia incrementa il tasso di formazione di precipitazione nelle parti sovraraffredate della nube.

Il metodo di inseminazione igroscopico prevede l'introduzione in nube di particelle fortemente igroscopiche (solitamente sali come il cloruro di calcio) che collezionano facilmente l'acqua presente nell'ambiente sovrassaturo per deposizione di vapore. Il metodo convenzionale prevede la produzione di particelle di sale a terra con un intervallo di dimensioni di 5-100 µm per rilasciarle poi alla base della nube.

Queste particelle crescono per deposizione di vapore e raggiungono velocemente una dimensione di 25-30 µm di diametro, abbastanza per agire da nuclei di coalescenza e far partire o partecipare alla formazione della pioggia per collisione e coalescenza.

Gli esperimenti che hanno ottenuto maggiori risultati positivi nell'utilizzo di questa tecnica sono stati quelli in Sudafrica (1991-96), in Messico (1997-98), in Thailandia (1995-98) ed in India (1973-74, 1976, 1979-86).

L'ipotesi fisica di tutti questi esperimenti di inseminazione igroscopica si basa sul concetto di inseminazione statica.

Si ipotizza che le particelle igroscopiche possano aumentare l'efficienza del processo di formazione della pioggia accelerando il processo di condensazione-coalescenza-collisione nella nube. Negli esperimenti sudafricani e messicani si tentò di ottenere questo processo introducendo nuclei di condensazione per influenzare il processo di condensazione allargando lo spettro dimensionale iniziale delle gocce; in quello thailandese ed indiano invece vennero introdotti nuclei di condensazione ultragiganti per passare direttamente ai processi di collisione-coalescenza. In entrambi i casi si sarebbe dovuto promuovere un più rapido sviluppo della precipitazione ed una maggiore raccolta dell'acqua disponibile in nube per produrre più pioggia di quella che si sarebbe verificata in maniera naturale.

Ognuno degli esperimenti infatti ha dimostrato che l'inseminazione igroscopica tende a promuovere l'ampliamento dello spettro delle goccioline di nube e un più rapido sviluppo degli embrioni di precipitazione.

Prima dell'esperimento sudafricano vennero eseguite delle inseminazioni di prova per testare l'ipotesi secondo cui il rilascio di piccole particelle igroscopiche nell'updraft avrebbero dovuto accelerare o migliorare la formazione di precipitazione per coalescenza nelle nubi inseminate. Dalle misurazioni effettuate ad un'altezza di circa 200 m dalla base della nube si è visto che il materiale disseminato dai flares igroscopici ha fortemente alterato lo spettro delle goccioline, presumibilmente abbassando il massimo della sovrassaturazione raggiunto negli strati più bassi della nube. Quindi è stato ridotto il numero dei nuclei di condensazione naturali attivati, ottenendo come risultato la condensazione di un minor numero di goccioline, ma di dimensioni più grandi.

L'inseminazione igroscopica è una tecnica relativamente nuova rispetto a quella statica e, anche se i risultati ottenuti finora con inseminazione tramite flares igroscopici sono molto promettenti, non c'è ancora l'evidenza fisica e statistica necessaria per stabilire che questa tecnica per aumentare la precipitazione è scientificamente provata. In generale, serve una migliore comprensione di come il momento, il luogo e l'intensità dei downdraft influenza l'autopropagazione di un sistema di nubi convettive.

Lo sviluppo e la valutazione di ipotesi fisiche attuabili dovrebbe essere fortemente supportata dall'uso di modelli numerici di nubi adatti in grado di coprire tutte le scale di interazione che sono coinvolte nel processo.

Data la grande quantità di esperimenti avvenuti negli ultimi cinquant'anni e la facilità con cui i loro esecutori ne hanno declamato gli esiti positivi, l'American Meteorological Society (AMS 1998) ha pubblicato alcuni criteri per permettere di valutare il successo o meno di qualsiasi attività di inseminazione di nubi:

"Poiché l'effetto previsto dell'inseminazione di nubi può ricadere all'interno della variabilità meteorologica naturale, è necessaria un'evidenza statistica e fisica per stabilire il successo di qualsiasi attività di inseminazione delle nubi. L'evidenza statistica è ottenuta in maniera efficace tramite un esperimento statistico randomizzato basato sul modello di inseminazione concettuale che è condotto e valutato in accordo con il suo design a priori, che porta al rigetto dell'ipotesi nulla con un alto livello di rilevanza. La plausibilità fisica che gli effetti dell'inseminazione suggeriti dall'esperimento statistico possano essere stati causati dall'intervento di inseminazione, cioè che l'evidenza fisica sia consistente con la significatività statistica, dev'essere stabilita attraverso misure di collegamenti determinanti all'interno della catena degli eventi fisici associati al modello fisico concettuale. L'evidenza fisica è essenziale per la conferma del modello concettuale, che mette le basi per trasferire la metodologia di inseminazione delle nubi in altre aree geografiche."

CAPITOLO 4

GLI ESPERIMENTI ISRAELIANI

Fin dagli anni 60 le scoperte ed i risultati di due esperimenti israeliani di inseminazione glaciogena statica sono stati visti come le principali dimostrazioni (se non le uniche) che l'inseminazione artificiale di nubi poteva aumentare in modo significativo la precipitazione al suolo, sotto determinate condizioni.

Le due ragioni per cui questi esperimenti avevano assunto questa posizione di fondamentale rilevanza nell'applicazione di questa tecnica erano:

1) sembravano verificare la plausibile ipotesi d'inseminazione statica, che presupponeva che l'aumento di particelle di ghiaccio in nubi (che ne erano naturalmente carenti) tramite inseminazione artificiale glaciogena poteva aumentare la precipitazione; 2) sembravano essere supportati da una forte evidenza statistica.

Il primo di questi due esperimenti, Israel-1, fu eseguito fra il 1961 e il 1967; il secondo, Israel-2, fra il 1969 e 1975 e fu considerato come un esperimento di conferma di Israel-1.

I controversi risultati di questi due esperimenti hanno innescato un'intensa discussione, che continua ancora ai giorni nostri, fra i loro fautori, K. R. Gabriel e D. Rosenfeld (Israel-1) e A. Gagin e J. Neumann (Israel-2), e vari scienziati che ne criticavano o difendevano le principali tesi. Un articolo in particolare di Rangno e Hobbs (1995; da ora RH95) ha screditato i principali risultati positivi degli esperimenti Israel-1 e 2 proponendo una nuova analisi fisica e statistica dei dati ottenuti.

In questo capitolo saranno presentati i due esperimenti, prima analizzandone gli aspetti operativi ed i principali successi statistici, in seguito esponendo le principali critiche e le diverse posizioni che si sono create in questi anni.

4.1 Il primo esperimento israeliano: ISRAEL-1

4.1.1 Aspetti operativi

L'esperimento d'inseminazione delle nubi Israel-1 è stato eseguito dalla metà di Ottobre fino ad Aprile compreso, negli anni che vanno dal 1961 fino al 1967. L'area d'interesse, mostrata in Fig.4.1, era una regione lunga approssimativamente 200 km e larga 60 situata nel centro e nel nord di Israele. Per valutare gli effetti dell'inseminazione, fu usato un design *randomizzato* ed *incrociato* con due aree bersaglio (chiamate *nord* e *centro*).

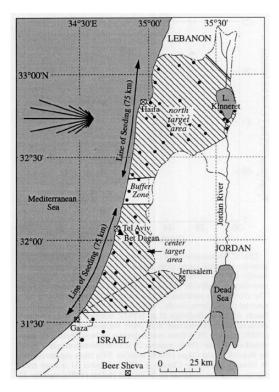


Figura 4.1: Mappa di Israele che mostra le aree bersaglio nord e centro (tratteggiate) e la buffer zone per Israel-1.

La correlazione complessiva della precipitazione fra le due aree era di circa 0.8 (Gabriel 1966), la quale suggeriva che c'era un regime precipitativo simile in entrambe le aree bersaglio simultaneamente. In seguito Gabriel (1970) corresse questa correlazione a 0.61 per i giorni con inseminazione al nord, 0.69 per i giorni con inseminazione al centro e 0.72 per il periodo fra il 1949 e il 1970.

Il design randomizzato prevedeva che, prima della stagione delle piogge, una delle due aree obbiettivo fosse casualmente assegnata a priori per essere inseminata o meno in ogni giornata compresa fra metà ottobre e metà aprile.

La precipitazione nello stesso giorno dell'area obiettivo non inseminata era classificata come precipitazione di controllo per valutare i risultati della pioggia nell'area obbiettivo inseminata. L'inseminazione non fu eseguita ogni giorno, come richiederebbe lo schema randomizzato, a causa della mancanza di nubi adatte, delle soste o periodi di fermo degli aerei, o per mancate previsioni. L'inseminazione fu effettuata da un singolo aereo che, volando lungo delle linee guida parallele alla linea costiera e sopravento rispetto alle aree bersaglio, rilasciava particelle di ioduro d'argento al livello della base della nube.

Una zona costiera larga 15 km compresa fra le zone obbiettivo venne chiamata "Buffer Zone" (BZ), orientata nord-nordest rispetto alla linea di inseminazione della zona bersaglio centrale. Se durante ventiquattro ore veniva registrata una precipitazione di almeno 0.1 mm in una delle tre stazioni di controllo, che si trovavano vicino alla costa all'interno della BZ, quel giorno era designato (post facto) come "giorno sperimentale" nelle analisi statistiche di Israel-1 perché, secondo Gabriel (1967) "la precipitazione nella BZ registrata dalle stazioni vicino al mare era usata per la classificazione (del giorno sperimentale), poiché poteva difficilmente essere influenzata dalle operazioni di inseminazione in quell'area".

Questo criterio servì per eliminare i giorni con assenza di precipitazione che si sarebbero accumulati, dato che ogni giorno della stagione delle piogge (non solo i giorni piovosi), era assegnato casualmente per l'inseminazione o meno nell'area bersaglio prima dell'inizio della stagione.

4.1.2 Principali risultati statistici

Le prime analisi di Israel-1 per entrambe le aree bersaglio combinate, e per un periodo di cinque stagioni e mezzo, indicarono che l'inseminazione delle nubi aveva aumentato la precipitazione di circa il 18% (Gabriel 1976). Successivamente, l'analisi di sei stagioni e mezzo da parte di Gabriel e Baras (1970) e da parte di Gagin e Neumann (1974, da ora GN74), portò l'incremento al 15% con un valore P di 0.009 (il valore P è la probabilità stimata di rigettare

l'ipotesi nulla dell'esperimento, se risulta minore del livello di significatività definito a priori nel test allora l'ipotesi nulla può essere rigettata)

I test statistici usati per ricavare l'incremento dovuto all'inseminazione erano due:

- SAR (Single Area Ratio): la precipitazione media nei giorni di inseminazione nelle aree obbiettivo divisa per la precipitazione media dei giorni non inseminati.
- RDR (Root Double Ratio): la radice quadrata del prodotto delle SARs per le due aree obbiettivo.

In tabella 4.1 sono illustrati i risultati ottenuti divisi per zone e per direzione del vento.

Area	All wind directions	Southwest winds	Northwest winds
(a) Single-area ratios			
North	1.08 (NS)	1.04 (NS)	1.52 (6%)
Buffer zone	1.31 (7%)*	1.32 (4.7%)*	1.05 (NS)*
Center	1.22 (NS)	1.16 (NS)	1.20 (NS)
(b) Root double ratios	` '	` ,	` ,
North and center combined	1.15 (2%)	1.10 (11%)	1.35 (1%)
Center and buffer zone combined	1.19 (0.1%)*	1.17 (1%)*	1.26 (1%)*

Tabella 4.1: (a) SAR e (b) RDR per l'esperimento di inseminazione di nubi Israel-1 durante i giorni sperimentali divise secondo la direzione del vento ad 850 hPa. La percentuale (unidirezionale) in parentesi indica la probabilità che il risultato sia dovuto al caso; NS (Non significativo) sta ad indicare che la probabilità era maggiore del 10%.

4.1.3 Analisi statistiche successive e controversie

Analisi indipendenti da parte di Wurtele (1971) portarono alla luce errori statistici di primo tipo (o falsi positivi, l'errore di rigettare un'ipotesi nulla quando questa è vera): questo perché le tre stazioni nella BZ, che non dovevano essere inseminate, ottennero più precipitazione nei giorni in cui l'area obbiettivo centrale era inseminata che negli altri giorni. Questo effetto dell'aumento della precipitazione nella BZ fu anche maggiore di quello nelle due aree obbiettivo nei giorni di inseminazione.

Poiché la precipitazione accumulata nella BZ acquisiva una significatività statistica alta nei giorni in cui il vento a 850 hPa proveniva da una direzione fra i

^{*} Le SAR e le RDR per la Buffer Zone furono definite da GN74 rispetto ai giorni assegnati all'inseminazione nell'area centrale.

181° e i 270° azimuth (quindi sud-sud ovest), GN74 conclusero che la maggiore precipitazione nella BZ nei giorni dell'esperimento era probabilmente dovuta ad inseminazione involontaria e combinarono i risultati della BZ nei giorni in cui l'area centrale era inseminata con quelli in cui l'area nord era inseminata.

Facendo questo ottennero la maggiore evidenza statistica dell'aumento di precipitazione dovuto ad inseminazione per Israel-1 (Tabella 4.1 (b)).

Perciò sono le SARs per la BZ e/o per l'area obbiettivo centrale che sono responsabili degli effetti generali positivi dell'esperimento Israel-1 riportati da Gabriel (1967), Gabriel e Baras (1970) e da GN74. Questo perché la SAR nel bersaglio nord è bassa (1.08) e statisticamente non significativa, mentre le SARs per la BZ e il bersaglio centrale sono molto grandi. Quindi è solo quando queste sono moltiplicate che si ottiene un RDR statisticamente significativo per tutto Israel-1.

Wurtele scoprì anche che solo durante il 5%-10% del tempo in cui l'area centrale era inseminata poteva esserci stato un trasporto dell'agente inseminante sopra la BZ. E' improbabile anche che la BZ sia stata inavvertitamente inseminata poiché dalla Fig.4.2 vediamo che i venti compresi fra 220° e 210° azimut (quelli che sarebbero serviti per provocare questa situazione) sono veramente rari in Israele Centrale.

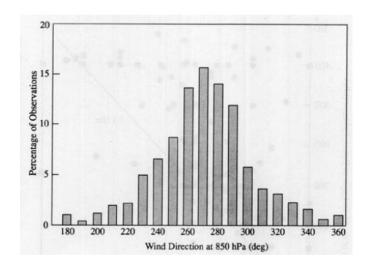


Figura 4.2: Frequenza delle varie direzioni del vento ad 850 hPa durante i periodi in cui pioveva a (o entro 60 km da) Bet Dagan, Israele, ed entro i 90 minuti dal lancio della radiosonda. I dati sono per le stagioni piovose (Novembre-Marzo) e sono basati su 10 anni (1978-87) di registrazioni dell'IMS (Israel Meteorological Service).

Rosenfeld (1997) nella sua risposta ad RH95 (da ora R97) obbiettò che dato che non era postulato a priori che la precipitazione sarebbe aumentata nella BZ nei giorni in cui veniva inseminata la zona centrale, la tesi di Wurtele sugli errori di primo tipo era irrilevante. Ribatté anche che se fosse vero che non c'era stata un inseminazione involontaria nella BZ, allora bisognerebbe sottrarre un 31% dall'effetto dell'inseminazione nel centro e aggiungere 31% all'effetto nel nord, facendo così rimanere invariato l'RDR complessivo di 1.15.

Brier et al. (1973) riportarono che nei giorni di inseminazione dell'area centrale ci fu una pioggia intensa nell'ovest della Giordania rispetto a quella nel sud del Libano.

Nei giorni d'inseminazione del nord trovarono invece una situazione opposta: pioggia intensa nel sud del Libano rispetto a quella nell'ovest della Giordania.

RH95 affermarono che questa situazione avrebbe potuto produrre un errore statistico di primo tipo.

Rosenfeld obbiettò che lo stato di Israele era abbastanza piccolo e che gli effetti dell'inseminazione avrebbero potuto raggiungere queste aree facilmente (che andavano da 20 a 120 km sottovento alle linee di inseminazione) e che, in ogni caso, questo aumento potrebbe essere dovuto ad una rigenerazione orografica delle nubi avvenuta ad est della valle della Giordania (60-70 km dalla costa).

RH95 affermarono che un'altra indicazione che potrebbero esserci stati problemi nell'attribuzione degli effetti dell'inseminazione in Israel-1 sono le SARs molto grandi nelle regioni costiere solo pochi km dopo le linee di inseminazione alla base della nube. Sostennero che era estremamente improbabile che la precipitazione a terra nelle regioni costiere che erano molto vicine (≤15 km) alla linea di inseminazione possano essere state influenzate dall'inseminazione stessa. R97 giustificò questo fatto proponendo delle osservazioni riguardanti la piana costiera israeliana e la sua particolare situazione meteorologica che permetteva alle nubi di invigorirsi lungo la costa a causa dell'interazione dei venti da ovest con un flusso di ritorno alla superficie. Secondo questo modello il materiale inseminato poteva facilmente venire eliminato con il downdraft per poi ricircolare dentro le nubi ad ovest della costa.

4.1.4 Analisi operative successive e controversie

In sette stagioni di Israel-1 fu condotta inseminazione aerea per un totale di 905 h durante 381 giorni di esperimento o 9144 h totali. Perciò, in media, soltanto 140 h per stagione furono inseminate e quindi solo 70 h per area bersaglio per stagione. Rispetto ai periodi di pioggia totali possiamo vedere che solo una piccola frazione fu inseminata, in media, circa il 25%-30%.

R97 affermò che questa percentuale era bassa a causa della frequente copertura dei cieli israeliani con nubi poco profonde che producevano una leggera pioggia e quindi non adatte all'inseminazione glaciogena. I criteri d'inseminazione erano stati progettati per evitare ore di volo inutili e spreco di risorse in questo tipo di nubi.

RH95 rivolsero l'attenzione al volume totale di nubi inseminate, vedendo che l'inseminazione era stata effettuata da un singolo aereo (DC-3) che volava approssimativamente a 70 m s⁻¹ all'altezza della base della nube convettiva (~0.6-1.0 km MSL). Le nubi che incontrava non erano continue ma erano formate da vari complessi di cumolonembi con delle zone intermittenti e, oltretutto, non si sapeva se la nube che veniva inseminata stava nascendo o stava dissolvendo e il tempo che l'aereo impiegava per tornare in uno stesso punto variava da circa 15 a 30 minuti. Considerando la diffusione verticale dell'agente rilasciato calcolarono che il 99% sarebbe rimasto entro i 2.1 km (entro 0.7 km dopo aver percorso 40 km) di altezza dal punto di rilascio. Venendo quindi rilasciato ad un'altezza di circa 0.8 km MSL, l'altezza effettiva massima raggiunta diventa 2.9 km MSL.

In situazioni tipiche in Israele, il livello di ghiacciamento è a 2 km (GN74); il livello di 2.9 km MSL è quello in cui la nube incontra la temperatura di -5°C che è quella dove lo ioduro d'argento inizia a nucleare.

RH95 affermarono quindi che con questo scenario è improbabile che l'agente inseminato abbia influenzato la precipitazione a terra entro 40 km sottovento alla traccia dell'aereo. Riportarono che da misure del trasporto e del mixing dello ioduro d'argento si vedeva che entro 15 minuti dal rilascio, il materiale si disperdeva molto poco, confinato all'interno di plumes molto strette fino al raggiungimento del top, dove poi veniva largamente disperso.

Considerando il fatto che quindi solo una piccola parte delle nubi fu influenzata dall'agente di inseminazione (l'aereo passava solo ogni 15-30 min) confermarono che era improbabile che avesse influenzato la precipitazione.

Per screditare questa tesi R97 citò uno studio fatto da Gagin e Arroyo (1995) che diceva che una concentrazione di particelle di AgI di 10 I⁻¹, in situazioni tipiche, veniva trovata il 50% delle volte ad una distanza di 25 km sottovento dalla linea di inseminazione. Se il 99% del materiale fosse rimasto al di sotto di 2.1 km (come affermato da RH95) dal livello di rilascio, allora il 99% dell'aria alla base della nube sarebbe rimasto all'interno dello stesso intervallo. Se così fosse accaduto, allora non sarebbe stato possibile la produzione di pioggia convettiva perché la convezione è alimentata dalla base della nube. Oltretutto affermò che c'è una fondamentale differenza fra un'inseminazione eseguita direttamente alla base della nube e una in una linea sopravento alle nubi. Nell'ultimo caso, il materiale inseminato avrebbe tempo di disperdersi nello strato turbolento al di sotto della base della nube e anche di ricircolare con il flusso di ritorno a bassi livelli.

Un altro problema emerso dalle analisi di RH95 sta nel fatto che il territorio che fu colpito da un aumento di precipitazione dovuto ad inseminazione era troppo grande rispetto alla quantità di ioduro d'argento rilasciato (considerando il sud del Libano, il sud-ovest della Siria e la Giordania è di circa 15.000 km²).

Un aumento della precipitazione del 15% significherebbe, per sei stagioni e mezzo, una quantità di 7.5 km³ di acqua. L'ammontare totale di AgI rilasciato fu di 8x10⁵ g (in 905 h di inseminazione a 850 g h⁻¹). Assumendo che solo l'1% del totale salga abbastanza per produrre cristalli di ghiaccio calcolarono che ogni grammo di AgI avrebbe dovuto produrre circa 500.000 m³ di acqua al suolo.

La critica di R97 fu che RH95 avevano usato 15% come percentuale di aumento della pioggia, ma la precipitazione totale aggiunta era solo la metà di questa quantità poiché solo la metà dei giorni venne inseminato in maniera random. In aggiunta, R97 sostenne che una percentuale dell'1% era troppo bassa rispetto a quella più reale del 10% per l'efficienza dell'AgI considerando la natura convettiva dell'atmosfera e la larga area sottovento (downwind) usata in questo calcolo. Con questi valori R97 ottenne una quantità di acqua compatibile con l'ammontare dell'agente inseminato.

Altri problemi sollevati da RH95 si spostano da pure analisi statistiche verso uno studio della climatologia della precipitazione e della microstruttura delle nubi.

4.1.5 Critiche riguardanti la climatologia della precipitazione in Israele

Questo esame fatto da RH95 si basò su dati di dodici stagioni di radiosondaggi fatti dall'Israel Meteorological Service (IMS) fra il 1973-75 e il 1978-87.

La stagione della pioggia in Israele è compresa quasi sempre fra Ottobre ed Aprile ed è associata alle saccature nei westerlies polari ad alta quota che si espandono verso sud in ottobre o novembre e si scontrano con il jet subtropicale che arriva dalle coste dell'Africa dell'ovest. Dato che la pioggia in questa zona si deve quasi esclusivamente alla convezione dell'aria polare o Artica che è passata sopra il mare Mediterraneo, l'evoluzione della temperatura nel mare Mediterraneo si riflette sulla temperatura della base delle nubi. Anche la direzione del vento influenza la temperatura della base delle nubi. Una base della nube più bassa e dunque più calda è generalmente associata con un flusso da ovest con lungo passaggio sopra le acque marine; una base più fredda invece è associata ad un flusso da nordovest con una traiettoria poco al di sopra del mare. Si nota che c'è una predominanza di un flusso da ovest quando piove.

I sistemi di nubi che portano pioggia in Israele si estendono per decine di km e mancano spesso di una chiara organizzazione.

Dalla Fig.4.3 si può vedere la distribuzione annuale della precipitazione in Israele: si registrano dei massimi vicino ai sistemi collinari o montuosi (c'è un'influenza orografica sulla precipitazione che però varia da un sistema precipitante all'altro) e si può notare un incremento della precipitazione andando verso nord da Israele verso il Libano (ci sono anche minimi improvvisi sottovento a questi massimi).

Da questa breve descrizione della situazione climatica di Israele RH95 trassero alcune importanti conclusioni che, secondo loro, potevano influenzare gli esperimenti di inseminazione Israel-1 e 2.

Secondo RH95, a causa delle sistematiche variazioni di temperatura della base delle nubi, che giocano un ruolo fondamentale nello sviluppo di grandi goccioline e nella concentrazione di particelle di ghiaccio, la microstruttura delle nubi in Israele, l'efficienza della produzione di pioggia "naturale", e la sensibilità delle nubi ad un aumento di pioggia dovuto ad inseminazione artificiale è probabile che varino con la progressione della stagione delle piogge.

Il passaggio di una saccatura ad alti livelli può causare grandi cambiamenti nell'altezza e nella temperatura del top delle nubi, quindi è difficile caratterizzare un periodo di 24 ore con una singola temperatura di top.

Inoltre affermarono che forti gradienti nord-sud e orografici della precipitazione sono comuni nelle perturbazioni israeliane e possono essere importanti per tutta la stagione delle piogge. Questi gradienti della precipitazione causati da diversi tipi di perturbazione hanno la potenzialità di oscurare o creare effetti apparenti sulla precipitazione dovuta ad inseminazione.

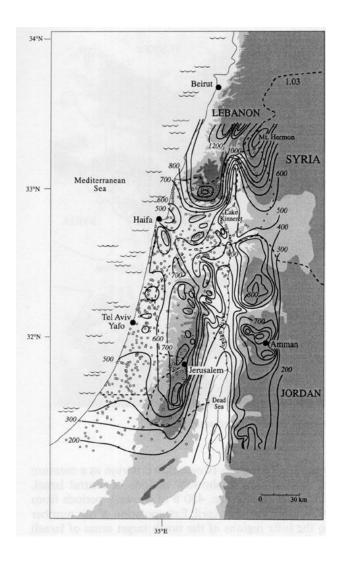


Figura 4.3: Precipitazione annua (mm) in Israele per il periodo 1859-1940. I cerchi indicano la posizione dei pluviometri dell'IMS.

4.1.6 Critiche riguardanti la microstruttura delle nubi in Israele

Per molti anni si sostenne che le nubi in Israele fossero inefficienti nel produrre pioggia poiché erano del tipo continentale (Gagin 1971, da ora G71, Gagin 1975, Gagin 1980). Questa conclusione si basava su studi che facevano vedere che le concentrazioni di goccioline erano sempre maggiori di 400 cm⁻³ e spesso superiori

a 1000 cm⁻³ (G71, G75, GN74). In queste ricerche si riportava anche che le nubi israeliane non contenevano particelle di ghiaccio rilevabili (>0.001 l⁻¹) finché la temperatura della nube non fosse scesa al di sotto di -14°C e che la concentrazione di particelle di ghiaccio raggiungeva una media di circa 10 l⁻¹ solo quando la temperatura al top della nube scendeva a circa -21°C (GN74, GN76, GN81,GN86).

Secondo RH95 questa descrizione della microstruttura delle nubi israeliane collimava con quella tipica "da manuale" delle nubi in cui è ottimale ottenere un aumento di precipitazione attraverso l'inseminazione artificiale.

Queste erano anche le basi fisiche per credere che l'inseminazione delle nubi in Israele avrebbe aumentato la pioggia, specialmente per nubi con una temperatura al top maggiore di -21°C.

Rangno e Hobbs (1997a,b,c) dimostrarono che la microstruttura delle nubi cumuliformi continentali israeliane era anomala rispetto a quella di altre nubi cumuliformi continentali studiate in vari luoghi di tutto il mondo.

Il ghiaccio appariva in concentrazione significativa (>1 I⁻¹) ad una profondità della nube minore e a temperature molto più alte di quelle riportate in Israel-1 e 2. Inoltre la concentrazione di particelle di ghiaccio riportata da G75 (e G74) era troppo bassa (20 I⁻¹ per nubi con temperatura al top di -28°C); generalmente, il massimo di concentrazione di particelle di ghiaccio in nubi continentali cumuliformi mature con temperatura al top compresa fra -10°C e -30°C è almeno di 100 I⁻¹.

Rangno e Hobbs (1995, 1997a,b,c) in base alle loro ricerche conclusero che le nubi in Israele potevano sviluppare precipitazione attraverso il processo dei cristalli di ghiaccio con temperature al top di -10°C.

Levin (1992) misurò la concentrazione di circa 50 e 1-10 l⁻¹ di cristalli di ghiaccio in due sistemi nuvolosi sopra Israele con temperature al top di -12°C e -10°C, rispettivamente. Misurò anche concentrazioni di goccioline di circa 250-400 cm⁻³ (comparate a quella minima di 400 cm⁻³ riportata da GN74 e G75).

Queste ed altre evidenze portarono alla tesi di RH95 che la visione delle nubi israeliane presentata da G75, G81, G86, GN74, GN76 e GN81 non era corretta. Appariva infatti che le nubi israeliane, come molte altre nubi cumuliformi con temperature alla base simili studiate in tutto il mondo, producessero grandi goccioline di nube, gocce di dimensione precipitante, alte concentrazioni di particelle di ghiaccio e precipitazione con una temperatura al top di -10°C.

Di conseguenza affermarono che le nubi israeliane non erano così adatte a sperimentazioni di aumento della pioggia tramite inseminazione artificiale come si credeva in precedenza.

RH95 segnalarono anche alcuni aspetti inusuali della microstruttura delle nubi israeliane riportati da GN74 e GN75 dovuti ad errori nei metodi di misura e nella scelta di momenti o luoghi poco adatti per avere un set di dati caratterizzanti quel tipo di nubi:

- Goccioline piccole in maniera anomala ad altezze di circa 2-2.5 km al di sopra della base della nube in nubi con temperatura alla base maggiore di 5°C;
- 2. Concentrazioni totali di particelle di ghiaccio stranamente basse;
- 3. Massimi di concentrazione di particelle di ghiaccio bassi (≤20 l⁻¹);
- 4. Concentrazione di particelle di ghiaccio che non aumentava nel tempo;
- 5. La grande profondità delle nubi e la bassa temperatura al top richieste per la formazione di ghiaccio con una concentrazione di solo (1 I⁻¹) di particelle di ghiaccio.
- 6. La mancanza di pioggia e di gocce di dimensioni precipitabili anche in nubi abbastanza profonde (>3 km) e in complessi con vita abbastanza lunga.

Rosenfeld rispose con varie obiezioni alle tesi di RH95:

innanzitutto affermò che non era mai stato detto che tutte le nubi dovevano essere adatte per l'aumento della precipitazione e che comunque l'inseminazione glaciogena delle nubi in cui c'erano processi di pioggia calda e accrescimento del ghiaccio aveva dimostrato effetti positivi, almeno nella scala delle celle convettive (e.g., Simpson e Woodley 1971; Gagin et al.1986; Rosenfeld e Woodley 1989, 1993). Secondo R97 inoltre, la descrizione di RH95 delle nubi israeliane si basava su misurazioni troppo scarse per elaborare qualsiasi generalizzazione.

R97 sostenne anche che solo il 4% della precipitazione in Israele era data da nubi con il top più caldo di -10°C, nubi che producevano una leggera pioggia e che erano molto persistenti e potevano essere presenti per una buona parte del periodo delle piogge. A parere di R97 la maggior parte della pioggia in Israele proveniva invece da nubi che duravano poco e con molta più convezione, dove l'efficienza della precipitazione era limitata principalmente dal fattore tempo.

La questione del tempo fu messa in evidenza anche da Woodley (1997) in una sua risposta ad RH95. Woodley affermò che il tempo era il primo fattore da considerare per progettare, eseguire, ed interpretare misure microfisiche della nube.

Secondo la sua esperienza, nubi giovani e vigorose contengono molto meno ghiaccio e molta più acqua di nube delle nubi vecchie in decadimento, a meno che la nube giovane non sia stata inseminata in maniera naturale dall'ingestione di detriti provenienti da cumuli vecchi e ghiacciati.

Affermare quindi che il tasso di concentrazione di ghiaccio nelle nubi israeliane era anomalo rispetto a misurazioni eseguite in altre parti del mondo dipendeva strettamente dal momento in cui erano state analizzate queste stesse nubi e quindi non poteva essere una prova certa dell'anomalia di queste nubi.

Anche se le affermazioni di RH95 nell'asserire che le nubi israeliane contenevano più ghiaccio di quanto detto in precedenza fossero esatte, il problema sarebbe stato di determinare se l'esistenza del ghiaccio in un determinato punto nel ciclo di vita di una nube avrebbe significato necessariamente che le nubi non avevano potenzialità per essere inseminate.

Esperimenti svolti in Texas nell'agosto 1994 durante il Texas Experiment in Augmenting Rainfall through Cloud Seeding (TEXARC) dimostrarono che:

- la struttura interna delle nubi è altamente variabile nel tempo e nello spazio
 e che quindi operare generalizzazioni con poche misurazioni è altamente
 rischioso;
- le nubi che contengono quantità di ghiaccio sostanziale appaiono "naturalmente" inseminate dai detriti delle nubi precedenti;
- la microfisica delle nubi non è una scienza esatta.

Secondo Woodley quindi sapere esattamente in che punto del suo ciclo di vita si trova una nube è un aspetto essenziale per poter associare una finestra temporale in cui poter eseguire un intervento d'inseminazione artificiale.

R97 obbiettò inoltre che i dati di RH95 si basavano su misure fatte in pochissime nubi (Levin 1992) per concludere che grandi concentrazioni di ghiaccio e di goccioline di nube erano tipiche in Israele. Senza un set minimo di dati e senza sapere la condizione della nube all'interno del sistema nuvoloso e il momento del suo ciclo vitale, questi studi, affermò, non avevano senso.

R97 concluse quindi che con i dati disponibili, RH95 non potevano affermare che le nubi israeliane erano principalmente marittime, semmai sembravano supportare

il suggerimento di Levi e Rosenfeld (1996) che le nubi che si creano all'interno del flusso da sud-ovest e vicino ai margini settentrionali del sistema nuvoloso subiscono l'influenza delle polveri desertiche.

4.2 Il secondo esperimento israeliano: ISRAEL-2

4.2.1 Aspetti operativi

Israel-2 fu un esperimento randomizzato di aumento della precipitazione considerato e valutato come un esperimento confermativo di Israel-1.

Le due aree bersaglio che si alternavano furono chiamate *Nord* (*N*), che escludeva la costa, designata come area di controllo che non doveva mai essere inseminata, e *Sud* (*S*). L'esperimento fu eseguito durante i sei inverni fra il 1969/70 e il 1974/75.

Ogni giorno fu assegnato casualmente per l'inseminazione o meno, nel nord o nel sud, che però venne effettuata solo quando erano trovate nubi adatte.

Fu scelta un'area di controllo sopravento al bersaglio nord, la cui precipitazione era altamente correlata con quella a nord ma meno con quella a sud.

Le principali caratteristiche di Israel-2 furono:

- La valutazione fu ristretta ai giorni con pioggia definiti dall'occorrenza di precipitazione misurabile nella buffer zone, che era fra le aree bersaglio.
- La precipitazione dei bersagli fu definita come una media delle stazioni in ogni area.
- Dal momento che l'obbiettivo nell'area nord era quella attorno al Lago Kinneret (evidenziata in Fig.4.4) la linea d'inseminazione fu spostata nell'entroterra; ciò lasciò la costa non inseminata, permettendo di usarla come area di controllo.
- Una rete di generatori a terra fu installata in entrambe le aree per supportare l'inseminazione aerea.

Durante l'esecuzione dell'esperimento fu deciso di concentrare l'analisi sul nord poiché "...dal 1969 al 1975 il Sud (S) non ha un'area di controllo e per questa ragione l'inseminazione nel S non è sperimentale" (Gagin e Neumann 1981, da ora GN81).

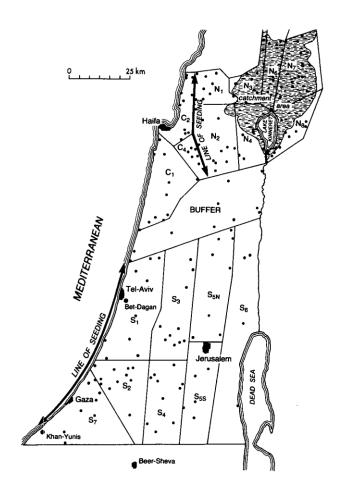


Figura 4.4: Aree sperimentali e sub-aree di Israel-2.

GN81 decisero che non era più applicabile uno schema incrociato (Nord vs Sud) e la loro analisi pubblicata nel 1981 essenzialmente trattò Israel-2 come un esperimento su di un'area singola nel Nord, comparando la precipitazione nella zona collinare del Nord nei giorni inseminati con la precipitazione nelle stazioni di controllo locate nella piana costiera sopravento all'area bersaglio nord.

Nel "crossover design", a causa della correlazione nella precipitazione fra le sue aree obbiettivo, quando un'area è (casualmente) inseminata, la precipitazione dello stesso giorno nell'area non inseminata veniva usata come precipitazione di controllo.

In questo caso il problema era che la precipitazione di una delle aree obbiettivo del giorno in cui la stessa veniva inseminata, era comparata con la precipitazione nella stessa zona, ma in giorni in cui l'altra area obiettivo era inseminata.

4.2.2 Principali risultati statistici

Saranno qui presentate le analisi eseguite da Gabriel e Rosenfeld (1990) (da ora GR90).

L'area di controllo originale fu divisa in due parti (Fig. 4.4), la parte più a nord C_2 usata come area di controllo per il Nord, mentre la parte più a sud, C_1 , usata come controllo per il Sud.

I test statistici utilizzati sono riportati nella Tab. 4.2:

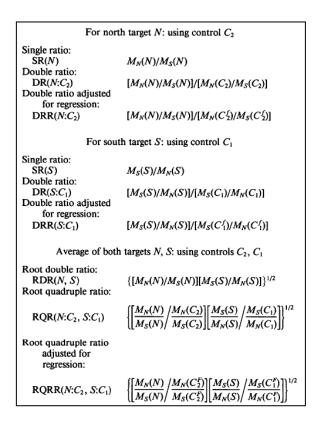


Tabella 4.2: Rapporti statistici utilizzati per stimare gli effetti dell'inseminazione nelle aree bersaglio. Sono definiti come rapporti delle medie della precipitazione $M_N(X)$ e $M_S(X)$ nell'area X quando l'inseminazione veniva effettuata rispettivamente al nord e al sud.

I principali risultati sono riportati nelle tabelle 4.3, 4.4 e 4.5.

Dalla Tab.4.3 si evince che usando soltanto le analisi previste inizialmente dall'esperimento non c'è nessun risultato significativo e nessuna evidenza di un effetto dell'inseminazione.

Se invece si esaminano separatamente i risultati per la parte Nord e per la parte Sud allora dalle Tab.4.4 e 4.5 si nota che gli effetti sono di un aumento della

precipitazione dell'ordine del 16% (o 20% per l'interno) per il Nord e invece di una diminuzione dell'ordine del 15% per la parte Sud.

	North vs south	Catchment vs southcentral
Targets only (RDR)	0.975 ± 0.052 $P = 0.64$	0.977 ± 0.055 $P = 0.67$
Targets vs controls (RQR)	0.992 ± 0.052 $P = 0.87$	0.994 ± 0.057 $P = 0.91$
Targets regressed on controls (RQRR)	0.983 ± 0.048 $P = 0.69$	0.984 ± 0.052 P = 0.76

Tabella 4.3: Stima degli effetti dell'inseminazione medi al Nord e al Sud (con errori standard) e livelli di significatività P.

	North	Catchment	Control C ₂
Means			
N-seeded days	8.906	9.033	8.244
S-seeded days	7.781	7.623	8.362
Ratios			
Target only (SR)	1.145 ± 0.122	1.185 ± 0.125	
• • • •	P = 0.23	P = 0.20	
Target vs control	1.161 ± 0.064	1.202 ± 0.079	
C_2 (DR)	P = 0.02	P = 0.02	
Target regressed	1.158 ± 0.061	1.198 ± 0.075	
on control C_2	P = 0.02	P = 0.02	
(DRR)			

Tabella 4.4: Precipitazione media e stima degli effetti dell'inseminazione al Nord (con errori standard) e livelli di significatività P.

100	South	Southcentral	Control C ₁
Means			
N-seeded days	7.704	8.273	8.478
S-seeded days	6.402	6.674	8.304
Ratios			
Target only (SR)	0.831 ± 0.131	0.805 ± 0.137	
	P = 0.15	P = 0.14	
Target vs control C_1	0.848 ± 0.107	0.822 ± 0.119	
(DR)	P = 0.12	P = 0.10	
Target regressed on	0.843 ± 0.100	0.817 ± 0.111	
control C_1 (DRR)	P = 0.10	P = 0.08	

Tabella 4.5: Precipitazione media e stima degli effetti dell'inseminazione al Sud (con errori standard) e livelli di significatività P.

GR90 operarono un'attenta analisi per valutare se c'erano differenze geografiche negli effetti, dividendo le due aree principali in sub-aree (come si può vedere dalla

Fig. 4.4), o se c'erano differenze fra le stagioni e fra i mesi ed elaborarono anche una comparazione fra i risultati sperimentali e i dati storici.

Le loro conclusioni suggerivano che la spiegazione più semplice sarebbe stata quella di attribuire i risultati al caso e che l'inseminazione non aveva avuto alcun effetto sulla precipitazione; però la maggior parte dei risultati permetteva di ipotizzare un effetto positivo dell'inseminazione al nord e un effetto negativo al sud. La spiegazione che proposero asseriva che in molte situazioni di pioggia c'erano molti nuclei di ghiacciamento al sud, a causa del confine dell'area con il deserto. Gagin (1965) dimostrò che la polvere del deserto, specialmente il "löss", e/o l'haze produceva una grande quantità di nuclei di ghiacciamento.

Gli autori scoprirono che quando era segnalata polvere o haze da parte di una delle quattordici stazioni dell'IMS apparentemente l'inseminazione non aveva nessun effetto, o quantomeno debole. Quando invece la polvere non era segnalata, l'inseminazione sembrava provocare un aumento della precipitazione di circa il 26% nell'area nord e una diminuzione del 12% nell'area sud. Postularono quindi che c'erano due regimi differenti nella microstruttura delle nubi in Israele:

- Nei giorni in cui non era presente polvere o haze, si ipotizzava che le nubi contenessero concentrazioni di particelle di ghiaccio basse e quindi poter essere adatte all'inseminazione.
- Nei giorni invece in cui era presente polvere o haze, si supponeva che le nubi contenessero un alto numero di particelle di ghiaccio e possibili gocce di dimensione precipitanti, così l'inseminazione artificiale non avrebbe avuto alcun effetto, comunque limitato (o avrebbe ridotto la precipitazione).

Quindi conclusero che l'inseminazione potrebbe essere stata controproducente quando è presente una grossa concentrazione di nuclei di ghiaccio naturali e invece avere un effetto positivo quando è bassa.

4.2.3 Critiche e controversie

Secondo RH95 non ci furono però misure microstrutturali della nube in situ per poter confermare l'ipotesi che la polvere e/o l'haze avessero influenzato le nubi israeliane. Oltretutto affermarono che un'alta concentrazione di particelle di ghiaccio in nubi (non inseminate) dipendeva dalla presenza di goccioline di nube relativamente grandi e non dalla presenza di polvere/haze.

In più non furono eseguite analisi di traiettoria delle masse d'aria per determinare se erano o no passate sopra regioni desertiche che, secondo RH95, sarebbero state necessarie. Quest'ipotesi poi sarebbe stata antitetica ai risultati apparenti di Israel1 che mostravano che il maggior effetto dovuto all'inseminazione era proprio nelle aree a sud vicino ai deserti e soprattutto quando il flusso proveniva da sudovest.

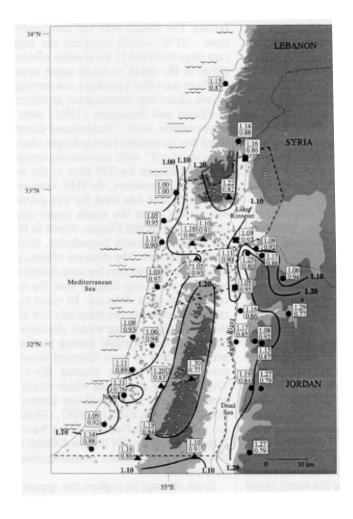


Figura 4.5: Isoplete della precipitazione media nei giorni in cui l'area nord fu inseminata diviso la precipitazione media dei giorni in cui non venne inseminata (SR(N)) per Israel-2. Il numero sotto la linea è la stessa statistica per l'area sud (SR(S)). I valori sono basati su tutti i dati pluviometrici disponibili pubblicati dall'IMS per il periodo 1969-75.

GR90 notarono che nei giorni in cui avvenne l'inseminazione nell'area nord la precipitazione su entrambe le aree obbiettivo fu del 40%-50% maggiore della precipitazione media giornaliera per il periodo 1949-60.

Come si vede dalla Fig.4.5 la precipitazione fu intensa dall'Israele centro-sud fino a Beirut e alla Giordania nei giorni in cui l'area nord venne inseminata.

La spiegazione di questi risultati (aumento nell'area nord e diminuzione nell'area sud) sia da parte di GR90 sia da parte di RH95 fu che la forte pioggia (naturale) che aveva colpito una vasta regione nei giorni in cui l'area nord era stata inseminata aveva una forte componente orografica: la pioggia naturale fu particolarmente forte nelle regioni collinari, ma diminuì d'intensità molto rapidamente nelle regioni sottovento rispetto alle colline.

4.2.4 L'esperimento operativo Israel-3 e nuove analisi

Dal 1975 fino al 1990 un terzo esperimento venne condotto in Israele. Fu svolta un'inseminazione soltanto nell'area nord con ioduro d'argento usando come controllo le zone costiere non inseminate, come in Israel-2.

L'inseminazione operativa non avvenne in modo random; si usò un modello storico per prevedere la precipitazione "naturale" (quindi non inseminata) nella zona bersaglio. I risultati non confermarono alcun effetto significativo dovuto all'inseminazione e Nirel e Rosenfeld (1995) conclusero che l'aumento di precipitazione in tutto il periodo fu solo del 6%, significativo al 2%.

Alcune recenti analisi tentarono di trovare una spiegazione per questi risultati:

- Kessler et al. (2006), su richiesta dell'Israeli Hydrological Service, analizzò gli effetti dell'inseminazione in Israele usando il Doppio Rapporto (DR) e metodi di regressione.
 - Le sue conclusioni furono che l'inseminazione operativa non contribuì all'aumento di precipitazione a terra.
- Givati e Rosenfeld (2005) elaborarono due possibili spiegazioni ai risultati di Kessler et al. (2006):
 - o la prima era che c'era stata una diminuzione costante della precipitazione con gli anni, fra l'area bersaglio e l'area di controllo, a causa dell'inquinamento dell'area di controllo. Quindi il rapporto obiettivo/controllo delle serie storiche dei giorni non inseminati non poteva essere confrontato con quello dei giorni attuali non inseminati.
 - La seconda spiegazione era che la maggior parte dei giorni non inseminati scelti da Kessler et al. (2006) per le loro analisi durante la parte operativa del progetto si concentravano nell'ultima parte

della stagione delle piogge, quando le condizioni meteorologiche e sinottiche erano a favore di pioggia intensa nelle aree (obiettivo) montagnose.

Alpert et al. (2008) e Halfon et al. (2009) hanno messo in dubbio la prima spiegazione perché non hanno trovato nessuna diminuzione costante nel rapporto di precipitazione fra le montagne (bersaglio) e la costa (controllo) che possa essere attribuita agli effetti dell'inquinamento, specialmente sui pendii delle montagne dove ci si sarebbe aspettata la diminuzione più intensa nelle precipitazioni.

In un articolo di Levin et al. (2010) in corso di pubblicazione (da ora LHA) è stata per la prima volta analizzata la situazione sinottica israeliana durante l'esperimento e si è cercato di collegare le depressioni profonde con l'aumento di precipitazione nell'area nord del paese.

Halfon (2008) e Saaroni et al. (2009) trovarono che la profondità dei cicloni/depressioni e la velocità del vento a bassi livelli (1000-850 hPa) ebbero un grande impatto sulle differenze di precipitazione fra l'area montagnosa (bersaglio) e l'area costiera (controllo).

Siccome la maggior parte della precipitazione in Israele avviene in presenza di cicloni nell'est del Mediterraneo, e a causa della dipendenza della precipitazione dalla profondità di queste depressioni, LHA crearono tre categorie sinottiche:

- Cicloni profondi
- Cicloni poco profondi
- Nessun Ciclone

In seguito ogni giorno con pioggia è stato inserito in una di queste tre categorie. Nei grafici che seguono il periodo che va dal 1949 al 2007 sarà chiamato "Full Period" mentre il periodo dal 1969 al 1975 sarà chiamato Israel-2.

Come nelle altre analisi è stato usato il metodo del Doppio Rapporto:

$$DR = \frac{(N_i / C_i)}{(N_n / C_n)} = \frac{N_i}{N_n} \times \frac{C_n}{C_i}$$

Dove N e C sono rispettivamente la precipitazione giornaliera nel bersaglio Nord e nella stazione di controllo e i pedici *i* e *n* stanno rispettivamente per giorni inseminati e non inseminati.

Il calcolo del DR è stato effettuato solo per i giorni in cui la pioggia era registrata da almeno il 75% delle stazioni di controllo attive, sia per i giorni di inseminazione sia per quelli di non inseminazione.

Il totale dei giorni non inseminati quindi passa da 6122 (dove la pioggia era registrata da almeno una stazione) a 1301; mentre quelli inseminati passano da 1398 a 1088.

È stato scelto anche di considerare solo le stazioni pluviometriche in cui l'errore standard sulla precipitazione giornaliera non eccede il 12% della media giornaliera.

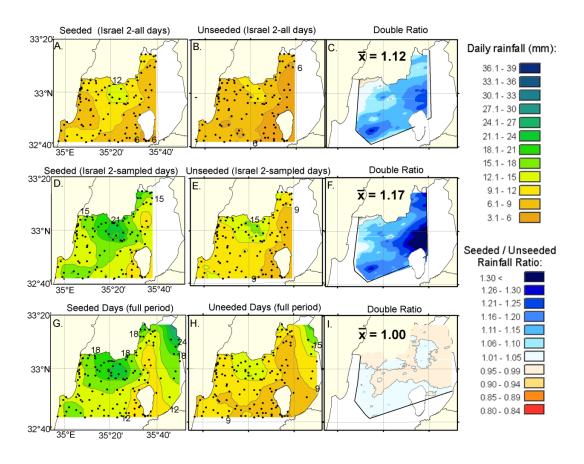


Figura 4.6 : Precipitazione media giornaliera nei giorni inseminati (A,D,G) e non inseminati (B,E,H). La colonna a destra fa vedere la mappatura del DR. Sono mostrate le differenze fra i risultati di Israel-2 (pannelli A,B,C per tutti i giorni e pannelli D,E,F per i giorni campionati) e il "Full Period" (pannelli G,H,I). (da Levin et al. 2010)

A causa anche di dati incompleti per l'intero periodo nella maggior parte delle stazioni si è dovuto calcolare, tramite vari fattori, tutti i valori mancanti per avere un set completo di dati sulla precipitazione media giornaliera in tutte le stazioni Dalla Fig.4.6 si possono vedere i risultati ottenuti: per l'esperimento Israel-2 si vede che il rapporto fra precipitazione media in un giorno d'inseminazione e precipitazione in un giorno non inseminato è circa 125% per l'area di controllo e arriva a 140% nell'area bersaglio. Il DR così varia da 0.95 nel nord-ovest a 1.25 nell'est con una media di 1.12.

Se si eliminano i giorni con poca pioggia e filtriamo secondo i criteri citati sopra vediamo che l'aumento è ancora maggiore e il DR raggiunge valori di 1.31-1.35 con una media di 1.17.

Analizzando il "Full Period" però si trova che il DR diventa esattamente 1.00. Questo perché nell'intero periodo il rapporto fra precipitazioni fra l'area bersaglio e l'area controllo è molto simile.

Secondo LHA quindi, non sembra esserci una relazione fra il momento scelto per l'inseminazione all'interno della stagione e quindi non può essere questa la spiegazione dei valori dei DR.

LHA analizzarono anche i dati in rapporto alla situazione sinottica ed emersero forti correlazioni fra le depressioni ed i valori dei DR: dalla fig.4.7 si può vedere che nel 41% dei giorni di inseminazione durante Israel-2 l'area era influenzata da depressioni profonde con un accumulo del 50% di tutta la precipitazione dei giorni inseminati. Dall'altra parte si vede che nei giorni non inseminati solo il 28% dei giorni è associato a depressioni profonde con un accumulo del 37% del totale della precipitazione

L'esame della velocità del vento ad 850 hPa e della profondità dei sistemi di bassa pressione ha portato alla luce una relazione che può spiegare le differenze di DR fra il periodo di Israel-2 e il "Full Period".

In conclusione, da una rianalisi degli esperimenti Israeliani LHA hanno dimostrato che l'inseminazione non ha prodotto l'aumento di precipitazione aspettato.

È stato dimostrato anche che gli alti valori di DR ottenuti durante l'esperimento Israel-2 sono largamente dovuti alle condizioni sinottiche, con depressioni profonde e venti intensi molo frequenti che hanno portato ad una penetrazione più efficiente delle nubi nell'entroterra e che hanno creato le condizioni ideali per l'evoluzione della precipitazione orografica.

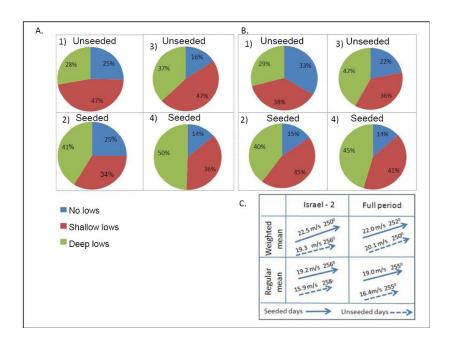


Figura 4.7: Differenze delle condizioni sinottiche fra i giorni inseminati e giorni non inseminati: (A)Distribuzione delle condizioni sinottiche durante Israel-2: 1-2 basate sul numero totale dei giorni di pioggia, 3-4 basate sulla pioggia totale accumulata nell'area di ricerca.
(B) Come in (A) ma per l'intero periodo di studio (1950-2007). (C) Velocità media e direzione del vento al livello di 850 hPa come misurate dalle radiosonde in Israele centrale durante i giorni di pioggia di Israel-2 e del "Full Period". (da Levi net al. 2010)

CAPITOLO 5

GLI ESPERIMENTI NEL RESTO DEL MONDO

In questo capitolo verranno presi in rassegna i principali esperimenti svolti al di fuori dello stato israeliano. Data la loro grande quantità, verranno esaminati soltanto quelli concepiti per dare un'evidenza statistica e fisica dell'efficacia dei metodi di inseminazione secondo i criteri dettati dall'AMS riportati nel terzo capitolo. Verranno considerati i risultati degli esperimenti statistici randomizzati condotti e analizzati in accordo con il loro design a priori come i più sicuri per la valutazione dell'effetto dell'inseminazione.

Per testare la validità dei vari esperimenti verrà usato il metodo adottato da Silverman (2001, 2003).

Quando in un design a priori viene specificata più di un'ipotesi da testare o analizzare, allora il livello statistico di significatività (solitamente 0.05) verrà adattato per tener conto della molteplicità delle analisi. Verrà usato il metodo Bonferroni, che prevede di dividere egualmente il livello statistico di significatività fra tutte le analisi/ipotesi indicate.

Il fallimento nel rigetto dell'ipotesi nulla non starà ad indicare che l'inseminazione non ha avuto effetto, semplicemente vorrà dire che le prove portate sono insufficienti per stabilire se l'inseminazione ha agito come era stato ipotizzato.

Il livello di significatività P (o valore P) convenzionalmente accettato per considerare un risultato sperimentale incoraggiante o promettente dovrebbe essere più piccolo di 0.5, valore solitamente associato come limite per il rigetto dell'ipotesi nulla in un esperimento a priori.

Data anche la grande quantità di materiale disponibile per ogni esperimento verrà riportato soltanto il metodo operativo, i principali risultati e le principali critiche.

Per comodità e per poter valutare in modo migliore i risultati gli esperimenti verranno divisi in esperimenti di inseminazione glaciogena (statica e dinamica) e igroscopica.

5.1 Esperimenti con inseminazione glaciogena statica

Gli esperimenti più importanti che utilizzano questa tecnica sono naturalmente gli esperimenti israeliani, già analizzati nel quarto capitolo.

Gli altri esperimenti di inseminazione glaciogena statica sono strettamente correlati con quelli israeliani e sono il tentativo di portare in altre parti del mondo la stessa tecnica applicata in Israele.

5.1.1 Spagna: l'esperimento WMO PEP

Nel World Meteorological Organization Precipitation Enhancement Project (WMO PEP, 1999) le nubi erano considerate come inseminabili per un aumento della precipitazione con metodo statico se 1) il processo di collisione-coalescenza era inefficiente, 2) il tasso di formazione di condensato sovraraffreddato eccedeva o era comparabile con il tasso di rimozione di acqua sovraraffreddata, 3) se c'era abbastanza tempo per la crescita delle particelle di precipitazione indotte dall'inseminazione prima che raggiungessero il terreno.

Dopo tre stagioni di studi sul campo il WMO terminò l'esperimento prima ancora di farlo ufficialmente partire poiché era difficile mettere in pratica i criteri sopra descritti per un'intrinseca possibilità di quantificare gli stessi.

5.1.2 Italia: l'esperimento Puglia

L'esperimento di inseminazione di nubi pugliese venne eseguito fra il 1988 e il 1994 esattamente replicando la struttura, e con la stessa tecnologia, dell'esperimento di aumento della precipitazione randomizzato ed incrociato israeliano: furono scelte due aree bersaglio (Bari e Canosa), divise da una "buffer zone", e altre due aree di controllo addizionali.

L'inseminazione fu compiuta tramite l'iniezione di ioduro d'argento da un aereo che volava vicino alle basi delle nubi lungo traiettorie predeterminate sopravento alle aree bersaglio.

Analisi dell'esperimento eseguite da List et al. (1999) non indicarono nessun effetto significativo dell'inseminazione: il valore dell' RDR era 0.92 (quindi una diminuzione dell'8%) con un valore P bidirezionale di 0.35.

Dato che l'esperimento non fu accompagnato da nessuna misura fisica e da nessuna modellistica, non fu possibile stabilire la plausibilità fisica di nessuna delle ipotesi sugli effetti dell'inseminazione e neanche se il modello concettuale d'inseminazione statica era applicabile alle nubi pugliesi, giustificando quindi o meno l'uso della tecnologia israeliana.

5.2 Esperimenti con inseminazione glaciogena dinamica

5.2.1 L'esperimento dei Caraibi

Durante l'estate del 1965 furono selezionate 23 nubi sopra l'oceano Caraibico, 14 delle quali vennero inseminate tramite aereo, rilasciando flares di ioduro d'argento nel top del cumulo, le restanti nove vennero invece studiate come controllo (Simpson et al. 1967).

L'esperimento fu progettato per testare l'effetto dell'inseminazione sulla crescita del cumulo e testare un modello unidimensionale (EBM 65) per predirlo.

Dalle analisi risultò una crescita in altezza delle nubi inseminate di 1.6 km rispetto a quelle di controllo con un livello di significatività pari a 0.01.

L'esperimento ebbe successo nel dimostrare le sue ipotesi con una forte significatività statistica e dimostrò anche l'affidabilità del modello EMB 65 nel prevedere l'ammontare della crescita e le condizioni richieste per essa.

Non fu studiato l'aumento di precipitazione legato all'inseminazione.

5.2.2 Gli esperimenti della Florida

> South Florida 1968 (SF68)

Come l'esperimento caraibico, l'SF68 era un esperimento su singola nube. Furono selezionate 19 nubi, 14 delle quali furono inseminate da un aereo, ad un'altezza approssimativa di 6.1 km MSL, con 1 kg di ioduro d'argento ciascuna; le altre cinque furono usate come controllo (Woodley 1970).

Lo scopo dell'esperimento era duplice: alterare le dinamiche della nube e incrementare la precipitazione come un sottoprodotto dell'alterazione dinamica.

La differenza di crescita media fra le nubi inseminate e quelle non risultò essere di 3.5 km, con un valore P di 0.005.

L'analisi tramite radar della precipitazione 40 minuti dopo il trattamento (R_{40}) indicò un aumento di quasi il doppio della precipitazione della nube inseminata, con un valore SR, che è il rapporto I/NI della precipitazione media della nube inseminata (I) fratto quella della nube non inseminata (NI), pari a 2.16 con un valore P bidirezionale minore di 0.20.

> South Florida 1970 (SF70)

Questo era un esperimento replica del precedente SF68 e furono selezionate 19 nubi della quali 13 furono inseminate e 6 no e usate come controllo (Simpson e Woodley 1971).

Dalle misure risultò che la differenza di crescita media era di 1.9 km, con un valore P di 0.01. L'analisi R₄₀ eseguita anche in questo caso indicò che l'SR era 1.57 con un valore P di 0.10.

In entrambi gli esperimenti nel sud della Florida gli obiettivi dello studio erano due: studiare la crescita della nube e l'aumento della precipitazione dovute all'inseminazione. In questo modo il livello di significatività richiesto per il rigetto dell'ipotesi nulla diventa 0.025.

Entrambi gli esperimenti hanno avuto quindi successo nel replicare i risultati dell'esperimento caraibico, ma nessuno dei due ha ottenuto un valore P necessario ad acquisire la significatività statistica minima per dimostrare gli effetti dell'inseminazione sulle nubi.

> FACE-1: Florida Area Cumulus Experiment 1

Questo esperimento fu eseguito sempre nel sud della Florida dal 1970 al 1976 (Woodley et al. 1982); si trattava di un esperimento randomizzato eseguito su un'area singola per scoprire se l'inseminazione di nubi convettive, secondo la tecnica dinamica, poteva aumentare la precipitazione su di un'area considerevole. Le prime variabili ottenute furono le stime della precipitazione da radar corrette con quelle pluviometriche nel *bersaglio totale (TT)* e nel *bersaglio fluttuante (FT)*, la parte più intensamente trattata.

Ci furono 104 giorni di sperimentazione, 53 inseminati e 50 non inseminati; di questi, 29 (14 inseminati e 15 non) vennero chiamati giorni A e 75 (39 inseminati

e 36 non) giorni B. I giorni B sono quelli in cui le nubi ricevevano più di 60 flares di ioduro d'argento, quelli A meno di 60.

Dalle analisi della precipitazione nelle sei ore (360 min) successive al trattamento (R₃₆₀) si ottenne un valore di SR per i giorni B di 1.49 (con P=0.01) e di 1.23 (con P=0.08) rispettivamente nel FT e nel TT.

Per i giorni A e B combinati si ottenne un valore di SR di 1.46 (con P=0.03) e di 1.29 (con P=0.05) rispettivamente nel FT e nel TT.

FACE-1 fu eseguito in seguito ai buoni risultati ottenuti in SF68 e SF70, ma a causa dei molti cambiamenti portati durante l'esperimento e della molteplicità delle analisi venne considerato un esperimento esplorativo come tutte le analisi ottenute da esso. In ogni caso dopo questo esperimento fu elaborato il primo modello concettuale di inseminazione dinamica.

> FACE-2: Florida Area Cumulus Experiment 2

Condotto fra le estati del 1978, 1979, e 1980 fu impostato come un esperimento di conferma dei risultati ottenuti in FACE-1 (Woodley et al. 1983).

Furono specificati tre diversi livelli di conferma:

- I. *Il primo e più debole livello di conferma:* il valore P modificato (per la molteplicità delle analisi) per il gruppo dei 2 doppi rapporti (DR) fra la precipitazione I/NI nel periodo delle 2-5 ore (120-300 min) dopo il trattamento, R₁₂₀₋₃₀₀, e la precipitazione I/NI 2 ore dopo il trattamento, R₁₂₀, nei giorni B, un doppio rapporto per l'FT e uno per il TT, dovevano avere un solido supporto probabilistico.
- II. Il secondo e moderatamente robusto livello di conferma: il valore P modificato per il gruppo dei due doppi rapporti del primo livello di conferma più i due SR della precipitazione I/NI nelle 6 ore (360 min) dopo il trattamento, R₃₆₀, nei giorni B, un doppio rapporto per l'FT e uno per il TT, dovevano avere un solido supporto probabilistico.
- III. *Il terzo e più robusto livello di conferma:* il valore P modificato per il gruppo dei due DR e dei due SR del secondo livello di conferma più i due SR della precipitazione I/NI nelle 6 ore dopo il trattamento, R₃₆₀, nei giorni A+B, un doppio rapporto per l'FT e uno per il TT, dovevano avere un solido supporto probabilistico.

A causa della molteplicità delle analisi, il valore P fu ottenuto moltiplicando il minimo valore P nel gruppo per il numero dei test statistici richiesti (2, 4 e 6 test statistici rispettivamente per il primo, il secondo e il terzo livello di conferma).

FACE-2 fallì nella conferma dei risultati di FACE-1 anche al primo livello di conferma poiché i valori P per i DR nell'FT e nel TT erano rispettivamente di 0.78 e di 0.81, anche senza considerare la molteplicità delle analisi.

FACE-2 fallì anche nella replica dei principali risultati di FACE-1: dalle analisi di R₃₆₀ nei giorni B, si ottenne un valore SR di 1.08 con un valore P di 0.42 e un SR di 1.04 con un valore P di 0.45 rispettivamente per l'FT e il TT.

Per la precipitazione R₃₆₀ nei giorni A+B si ottenne un valore SR di 1.21 (P=0.30) e di 1.03 (P=0.45) rispettivamente per l'FT e il TT.

5.2.3 L'esperimento del Texas

Fu eseguito in un area centrata sopra Big Spring in Texas durante il 1986, 1987, 1989, 1990 e 1994 (Rosenfeld e Woodley 1989,1993; Woodley e Rosenfeld 1996). Era progettato per testare l'effetto dell'inseminazione con flare di ioduro d'argento in cluster convettivi a mesoscala (unità sperimentali) e nelle celle convettive trattate (unità di trattamento) all'interno delle unità sperimentali. Rosenfeld e Woodley (1993) affermarono che: "Sono le celle che ricevono il trattamento ed ogni effetto dell'inseminazione dovrebbe manifestarsi innanzitutto in questa scala, prima di essere visto nelle unità sperimentali che contengono queste celle".

Durante l'esperimento si ottennero 38 unità sperimentali (18 I e 20 NI).

L'analisi delle celle individuali fu limitata a 28 unità sperimentali (13 I e 15 NI) a causa della cattiva qualità dei dati radar nel 1986.

Le 28 unità sperimentali contenevano 213 *celle a traccia lunga* (quelle che venivano seguite anche durante tutte le fusioni e divisioni, finché la cella non stava decadendo) di cui 99 I e 114 NI, e 209 *celle a traccia corta* (quelle seguite finché non avveniva una divisione o una fusione) di cui 97 I e 112 NI.

La valutazione dei dati portò a questi principali risultati: il valore dell'SR per la massima altezza raggiunta delle celle a traccia lunga trattate, H_{LTC} , e per le celle a traccia corta, H_{STC} , fu rispettivamente di 1.10 (P=0.21) e 1.00 (P=0.04).

Il valore dell'SR per la precipitazione stimata da radar per le celle a traccia lunga, R_{LTC} , e per le celle a traccia corta, R_{STC} , fu rispettivamente di 2.63 (P=0.014) e 1.69 (P=0.04).

Il valore dell'SR per la precipitazione stimata da radar per le unità sperimentali 150 min dopo la loro definizione, R_{150} , fu di 1.45 (P=0.16).

Date le impostazioni dell'esperimento, in esso erano implicite tre ipotesi nulle:

- 1. l'inseminazione non aumenta l'altezza massima delle celle a traccia corta trattate;
- 2. l'inseminazione non aumenta la precipitazione delle celle a traccia corta trattate;
- 3. l'inseminazione non aumenta la precipitazione delle unità sperimentali trattate.

In questo modo il livello di significatività per ciascuna delle ipotesi nulle scende a 0.0167.

I risultati riguardanti le celle a traccia lunga devono essere guardati con cautela poiché l'analisi di queste celle è stata introdotta per la prima volta durante questo esperimento e quindi è considerata esplorativa.

Per quanto riguarda gli altri dati, nessuna delle ipotesi nulle può essere rigettata con il dovuto livello di significatività.

Dai risultati ottenuti si è potuto però arrivare al secondo modello concettuale di inseminazione dinamica messo alla prova poi negli esperimenti thailandesi.

5.2.4 L'esperimento Cubano

Fu eseguito dal 1985 al 1990 con lo scopo di testare l'inseminazione attraverso lo ioduro d'argento per aumentare la precipitazione, misurata da radar, in nubi convettive individuali e in cluster di nubi sopra Cuba (Koloskov et al. 1996).

Fu suddiviso in due momenti, una parte esplorativa nel 1985 per determinare il tipo di nubi convettive che rispondevano in modo migliore all'inseminazione, e una fase di conferma dal 1986 al 1990, eseguita su nubi convettive individuali (CUBA-1) e su cluster di nubi a mesoscala (CUBA-2).

Le nubi classificate come adatte a essere inseminate risultarono nubi otticamente dense, in crescita, con il top che al momento del trattamento aveva raggiunto un'altezza di 6-8 km (con temperature fra i -10°C e i -20°C) e con un diametro (al top) fra i 2 e i 5 km. Le nubi inseminate che corrispondevano a questi criteri

sembravano crescere più alte, durare più a lungo, e produrre più precipitazione di quelle non inseminate.

Queste le proprietà delle nubi che furono stimate tramite radar : volume di pioggia (R), massima altezza eco al top (H), massima riflettività radar (Z), massima area eco (AM), area eco totale integrata (AI) e durata dell'eco (T).

> CUBA-1

Furono individuate 46 nubi convettive individuali, delle quali 24 furono inseminate e 22 non inseminate. Fra queste 46 solo 20, di cui 11 inseminate e 9 non inseminate, rientrarono nella categoria di nubi adatte ad essere trattate.

Tutti i valori sono riportati nella tabella 5.1 e i risultati con il suffisso 68 sono quelli riguardanti le 20 nubi adatte ad essere inseminate.

> CUBA-2

Furono individuate 82 cluster di nubi a mesoscala, 42 inseminati e 40 non inseminati. Fra questi solo 42, di cui 19 inseminate e 23 no, rientrarono nella categoria di nubi adatte ad essere trattate.

I risultati sono riportati nella tabella 5.1.

Da un punto di vista statistico, possiamo vedere che i risultati delle analisi della parte di nubi adatte a essere inseminate in CUBA-1 e CUBA-2, secondo l'esperimento esplorativo, sono tutti non statisticamente significativi, dato che il livello di significatività per ognuna delle proprietà stimate da radar è 0.0083 (=0.05/6).

5.2.5 L'esperimento thailandese

L'esperimento si svolse fra il 1994 e il 1998 nel nord-ovest della Thailandia per determinare il potenziale di inseminazione dello ioduro d'argento di aumentare la precipitazione su una vasta area (più di 2000 km²) (Woodley et al. 1999).

Ci fu un esperimento esplorativo condotto fra il 1991 e il 1993 che riportò un incremento della precipitazione dovuto all'inseminazione del 173% di otto nubi inseminate rispetto a sette che erano di controllo.

Questo fu un esperimento di conferma attuato in accordo con il design formale, randomizzato e con bersaglio fluttuante creato dopo l'esperimento texano.

Le unità trattate furono nubi vigorose sovraraffreddate che si formavano all'interno dell'unità sperimentale, un cerchio con un raggio di 25 km centrato sulla nube sotto osservazione.

Si ottennero 62 unità sperimentali, 31 I e 31 NI. Il rapporto della precipitazione dopo 5 ore (300 min) dall'individuazione dell'unità, R_{300} , fra I e NI fu 1.48, con un valore P di 0.11. Le 62 unità sperimentali erano composte da 642 celle a traccia lunga (352 I e 289 NI). Da un'analisi dei dati delle celle si ottenne che l'SR per le precipitazioni delle celle a traccia lunga, R_{LTC} , era 1.35 (P=0.11).

Woodley et al. (1999) eseguirono un'analisi esplorativa usando tutte le unità sperimentali ottenute sia durante la fase esplorativa che durante quella confermativa. Da questa si vide che l'SR per R_{300} fu di 1.58 con un valore P di 0.05 e l'SR per R_{600} fu 1.91 con un valore P di 0.03.

Questi risultati furono sicuramente influenzati da quelli molto favorevoli ottenuti nell'esperimento esplorativo.

La valutazione dell'esperimento thailandese secondo il suo design a priori non porta a risultati statistici significativi.

Contrariamente ai postulati del secondo concetto di inseminazione dinamica, venne trovato che le nubi trattate non davano gli effetti prescritti dell'inseminazione; non ci fu un incremento della precipitazione statisticamente significativo e la precipitazione e il presunto aumento del downdraft prodotto da questo aumento non sembrava essere ritardato.

Un'altra apparente inconsistenza con il modello fu che la riflettività radar delle unità inseminate era minore di quella delle unità non inseminate.

Woodley et al. (1999) riscontrarono anche che la differenza media del volume di pioggia fra I e NI aumentava continuamente con il tempo fino a raggiungere un massimo 8 ore dopo l'identificazione dell'unità sperimentale o circa 6 ore dopo la fine del'inseminazione; questo risultato porterebbe ad un'altra revisione del secondo modello concettuale.

Esperimento	Risultati ottenuti (previsti dal design a priori)	Analisi esplorative
Caribbean single cloud	$H_{\rm S} - H_{\rm NS} = 1.6 \text{ km} (< 0.01)$	
SF68 single cloud	$H_{\rm S} - H_{\rm NS} = 3.5 \text{ km } (0.005)$ SR(R ₄₀) = 2.16(0.10), w/o radar controls	SR $(R_{40}) = 2.44(0.05)$, with radar controls
SF70 single cloud	$H_{\rm s} - H_{\rm NS} = 1.9 \text{ km } (0.01)$ SR (R ₄₀) = 1.57 (0.10), with radar controls	SR $(R_{LT}) = 2.80(0.05)$, with radar controls
FACE-1 area		FT (B days) SR (R_{360}) = 1.49 (0.01) TT (B days) SR (R_{360}) = 1.23 (0.08) FT (A+B days) SR (R_{360}) = 1.46(0.03) TT (A+B days) SR (R_{360}) = 1.29(0.05)
FACE-2 area	FT (B days) SR (R_{360}) = 1.08 (0.42) TT (B days) SR (R_{360}) = 1.04 (0.45) FT (A+B days) SR (R_{360}) = 1.2 (0.30) TT (A+B days) SR (R_{360}) = 1.03 (0.45)	
Texas mesoscale cluster	SR (H _{STC}) = 1.00 (0.47) SR (R _{STC}) = 1.69 (0.04) SR (R ₁₅₀) = 1.45 (0.16)	$SR (H_{LTC}) = 1.10 (0.21)$ $SR (R_{LTC}) = 2.63 (0.014)$
Cuba-1 single cloud	SR (T68) = 1.24 (0.07) SR (R68) = 2.22 (0.07) SR (H68) = 1.08 (0.49) SR (AI68) = 1.64 (0.10) SR (Z68) = 1.05 (0.23) SR (AM68) = 1.38 (0.20)	SR (T) = 1.11 (0.21) SR (R) = 1.47 (0.22) SR (H) = 1.04 (0.77) SR (AI) = 1.31 (0.18) SR (Z) = 1.03 (not given) SR (AM) = 1.20 (not given)
Cuba-2 mesoscale cluster	SR (T68) = 1.21 (0.04) SR (R68) = 1.65 (0.02) SR (H68) = 1.17 (0.01) SR (AI68) = 1.33 (0.03) SR (Z68) = 1.01 (0.84) SR (AM68) = 1.28 (0.05)	SR (T) = 1.15 (0.13) SR (R) = 1.43 (0.04) SR (H) = 1.08 (0.06) SR (AI) = 1.19 (0.07) SR (Z) = 1.00 (not given) SR (AM) = 1.07 (not given)
Thailand mesoscale cluster	SR (R_{LTC}) = 1.35 (0.11) SR (R_{300}) = 1.48 (0.11)	$SR (R_{300}) = 1.58 (0.05)$ $SR (R_{600}) = 1.91 (0.03)$ $SR (R_{LTC}) = 1.36 (0.07)$ $SR (H_{LTC}) = 1.03 (0.28)$

Tabella 5.1: Sommario dei principali risultati statistici degli esperimenti di inseminazione dinamica per l'altezza della nube (H) e la precipitazione (R). Il valore fra parentesi è il valore P riferito ad ogni risultato. In grassetto i risultati, previsti dal design a priori, che sono statisticamente significativi quando comparati al livello di significatività ottenuto dall'applicazione del metodo Bonferroni (0.05/numero di valutazioni a priori)

5.3 Esperimenti con inseminazione igroscopica

5.3.1 L'esperimento del Sudafrica

L'esperimento d'inseminazione igroscopica sudafricano fu lanciato fra il 1991 e il 1992 e continuò per cinque anni (Mather et al. 1997).

Era un esperimento randomizzato, basato su un design con bersaglio fluttuante, dove le unità sperimentali erano temporali convettivi che si trovavano all'interno di un raggio di circa 100 km dal radar situato a Betlemme e a Carolina, due città del Sudafrica.

Tutti i temporali selezionati per il trattamento random (inseminare o non inseminare) producevano un'eco radar prima di essere inseminati e la maggior parte stavano già producendo precipitazione.

I temporali furono inseminati alla base della nube con flares igroscopici che producevano piccole particelle di sale di circa 0.5µm di diametro medio.

Durante l'esperimento furono selezionati 127 temporali, 62 inseminati e 65 non inseminati.

Mather et al. (1997) riportarono che i temporali più circoscritti rispondevano al trattamento più velocemente, quelli medi un po' dopo ed i più grandi per ultimi.

Silverman (2003) analizzò nuovamente il design dell'esperimento e concluse che una valutazione a priori dell'esperimento si sarebbe dovuta basare sulle analisi medie dei 5 intervalli di 10 minuti fra i 10 e i 60 minuti dopo la decisione di inseminare.

In tabella 5.2 si possono vedere i risultati dell'esperimento sudafricano: l'effetto dell'inseminazione e il suo supporto statistico aumentano in maniera continua fra i 20 e i 60 minuti dopo il momento della decisione, con l'effetto dell'inseminazione (SR-1) nell'intervallo fra i 40 e i 50 min che è statisticamente significativo anche usando il rigido livello di significatività di Bonferroni.

I risultati indicati come RR-1 rappresentano i valori di SR-1 modificati per essere sicuri che non siano dovuti agli effetti della "covariante potenzialmente compromettente", il fatto cioè che la massa di pioggia nelle nubi inseminate era maggiore di quella delle nubi non inseminate nell'intervallo di 10 minuti prima del momento della decisione.

Intervallo (min)	SR - 1	Valore P	RR - 1	Valore P
10-20	0.21	0.192	0.06	0.252
20-30	0.38	0.096	0.23	0.096
30-40	0.62	0.038	0.50	0.032
40-50	1.16	0.006	1.04	0.006
50-60	1.33	0.014	1.22	0.020

Tabella 5.2: Risultati dell'esperimento di inseminazione igroscopico sudafricano. L'effetto proporzionale dell'inseminazione (SR-1) è riportato con affianco il suo valore P, lo stesso per RR-1. I valori di SR-1 con valore $P \le 0.01$, il livello di significatività di Bonferroni (0,05/5) sono mostrati in grassetto.

In tabella 5.3 sono riportati i dati divisi secondo l'area di sperimentazione e le dimensioni del temporale al momento della selezione. Tutti i risultati sono esplorativi e i valori P sono indicati solo per valutare la forza dell'effetto.

Volume del	Area dell'esperimento			
temporale	Entrambe	Carolina	Betlemme	
Entroush:	0.41	0.27	0.53	
Entrambi	(0.044)	(0.173)	(0.069)	
Piccolo	1.25	0.30	3.20	
(750 km^3)	(0.001)	(0.162)	(0.000)	
Grande	-0.07	0.14	-0.25	
(>750 km ³)	(0.364)	(0.332)	(0.243)	

Tabella 5.3: Stima della massa di pioggia fra 0 e 60 min divisa per area e per volume del temporale al tempo della decisione, modificato secondo gli effetti della covariante potenzialmente compromettente.

I valori solo quelli di RR-1, con il valore P in parentesi al di sotto.

Si può vedere che l'inseminazione non ha effetti apparenti nei sistemi nuvolosi con un volume (al tempo della selezione) maggiore di 750 km³, sembra essere insufficiente e essere effettuata troppo tardi nei temporali che sono già molto grandi quando vengono selezionati.

Il risultato più "incredibile" che emerge è il forte effetto dell'inseminazione nell'area di Betlemme nei temporali con un volume $\leq 750 \text{ km}^3$.

Questo risultato in accordo con il design originale conferma la tesi di Mather et al. (1997) secondo cui c'è un'evidenza statistica che l'inseminazione tramite flares igroscopici ha aumentato la massa di pioggia nell'esperimento.

5.3.2 L'esperimento del Messico

L'esperimento messicano, conosciuto anche come Program for the Augmentation of Rainfall in Coahuila (PARC), venne condotto nello stato del Coahuila nel Messico del nord durante le estati del 1997 e 1998 (Bruintjes et al. 1999, 2001).

Lo scopo era di replicare l'esperimento sudafricano e quindi tutte le procedure e il design dell'esperimento erano uguali a quelle dell'esperimento svoltosi in Sudafrica.

Durante l'esperimento furono selezionati 99 temporali, 47 furono inseminati e 52 non inseminati.

Come per il Sudafrica, le valutazioni del PARC si basarono sulla stima tramite radar della massa di pioggia prodotta dai complessi di nubi convettive.

Il gran numero di variabili e ipotesi di risposta che dovevano essere testate comprendeva il flusso di precipitazione, la massa totale del temporale, la massa del temporale al di sopra di 6 km MSL, l'area del temporale e l'altezza di massima riflettività.

L'ipotesi statistica era che le nubi inseminate avrebbero dimostrato un aumento di queste variabili rispetto alle nubi non inseminate fra i 20 e i 50 min dopo la selezione. Applicando il metodo di Bonferroni per la divisione del livello di significatività di 0.05 fra tutti i test specificati, sarebbe improbabile che uno di essi possa soddisfare il livello di significatività richiesto.

Nella tabella 5.4 possiamo vedere i risultati secondo la stessa divisione dell'esperimento sudafricano elaborati da Silverman (2003).

Si può notare che gli esiti sono abbastanza positivi e che l'effetto dell'inseminazione sembra avere un picco prima di quello verificatosi nell'esperimento sudafricano.

Prima dell'esperimento messicano erano state compiute delle misure sulle caratteristiche microstrutturali delle nubi sopra lo stato del Coahuila ed era stato verificato che esse erano molto simili a quelle sudafricane.

Intervallo (min)	SR – 1	Valore P	RR - 1	Valore P
10-20	0.42	0.072	0.29	0.004
20-30	0.56	0.094	0.42	0.006
30-40	0.91	0.038	0.73	0.014
40-50	0.72	0.088	0.56	0.032
50-60	0.86	0.098	0.68	0.046

Tabella 5.4: Risultati dell'esperimento di inseminazione igroscopico messicano. L'effetto proporzionale dell'inseminazione (SR-1) è riportato con affiancato il suo valore P, lo stesso per RR-1.

L'esperimento messicano sarebbe stato statisticamente significativo se nel suo design fossero state specificate le stesse ipotesi di quello sudafricano. Proprio a causa della moltitudine di ipotesi specificate nell'esperimento messicano non è possibile ottenere una significatività statistica e una valutazione dei suoi risultati.

5.3.3 L'esperimento della Thailandia

L'esperimento fu condotto fra il 1995 e il 1998 nell'area di Bhumibol, nel nordovest della Thailandia (Woodley et al. 1999). I bersagli dell'inseminazione erano nubi convettive calde, semi-isolate e contenute in una ben definita unità sperimentale.

L'inseminazione fu effettuata disperdendo particelle di cloruro di calcio negli updraft delle nubi convettive in crescita (ad un livello di circa 1-2 km sopra la base della nube) che non avevano ancora sviluppato precipitazione.

Durante i quattro anni dell'esperimento furono selezionate un totale di 67 unità sperimentali (34 inseminate e 33 non inseminate).

Le stime statistiche erano basate su un'analisi rirandomizzata delle SR del volume di pioggia alla base delle nubi (I/NI).

L'esperimento fu concepito per testare le seguenti due ipotesi nulle: H01 (l'inseminazione con il cloruro di calcio non alterava il volume di precipitazione totale per ogni unità sperimentale 30 minuti dopo la fine del trattamento) e H02 (l'inseminazione con il cloruro di calcio non alterava il volume di precipitazione totale per ogni unità sperimentale durante tutta la permanenza di questa).

Si trovò che l'effetto proporzionale dell'inseminazione secondo H01 era del 10% con un valore P di 0.44, quello secondo H02 era del 109% con un valore P di 0.02. Dato la presenza di due ipotesi nulle, secondo il metodo di Bonferroni, il minimo livello di significatività per il rigetto doveva essere 0.025.

Si può quindi rigettare l'ipotesi H02 e confermare che l'esperimento thailandese fornisce un'evidenza statistica significativa che l'inseminazione igroscopica può aumentare la precipitazione in nubi convettive calde.

5.3.4 L'esperimento dell'India

L'esperimento indiano fu eseguito durante 11 stagioni estive monsoniche (1973-74, 1976, 1979-86) nello Stato del Maharashtra in India (Murty et al. 2000).

Era un esperimento randomizzato incrociato con due aree obbiettivo (nord e sud) separate da una "buffer zone", ciascuna di 1600 km².

Nei giorni dichiarati sperimentali, le nubi nell'area casualmente selezionata venivano inseminate con 1000~kg di particelle di cloruro di sodio finemente polverizzato (con diametro di circa $10~\mu m$) rilasciate da un aereo ad un'altezza di 200-300~metri sopra la base della nube.

Durante gli 11 anni di esperimento ci furono 160 giorni sperimentali.

La valutazione era basata sulla precipitazione nelle 24 h misurata da 90 pluviometri. L'effetto dell'inseminazione ottenuto fu stimato tramite la RDR (radice quadrata del doppio rapporto) e il suo effetto proporzionale (RDR-1) risultò del 24% con un valore P di 0.04.

Analizzando i dati in maniera separata per l'area nord e l'area sud possiamo vedere che l'SR per il bersaglio nord è 1.649 mentre quello per il bersaglio sud è 0.923, risultati molto simili alla situazione di Israel-2.

Murty tentò di supportare i suoi risultati tramite ipotesi sulla microfisica delle nubi derivanti da osservazioni fisiche su nubi trattate non appartenenti all'esperimento d'inseminazione. Inoltre il tasso d'inseminazione usato per queste nubi "di prova" sembra essere di circa un ordine di grandezza più grande di quello usato per le nubi nell'esperimento. A causa di questa differenza d'inseminazione e della mancanza di misure fisiche durante l'esperimento ufficiale le ipotesi di Murty non possono essere usate per giustificare la plausibilità fisica dell'esperimento e i suoi risultati statistici.

CAPITOLO 6

CONCLUSIONI, PROBLEMI APERTI E PROSPETTIVE OPERATIVE

Dall'analisi dei numerosi esperimenti che si sono svolti negli ultimi cinquant'anni e dei loro risultati si è visto che non si è ancora riusciti ad ottenere l'evidenza statistica e fisica necessaria per stabilire la loro validità scientifica.

Comunque sono stati fatti notevoli passi avanti nella comprensione delle varie tecniche e dei processi microfisici che stanno alla base dell'inseminazione artificiale delle nubi per l'aumento della precipitazione.

Gli esperimenti israeliani, a lungo visti come la conferma della validità della tecnica d'inseminazione statica, sono stati "messi sotto torchio" e analizzati in profondità per confermare o no la legittimità della loro "fama".

Interpretando rigorosamente i risultati dei due esperimenti si deve concludere che l'inseminazione non ha accumulato la necessaria evidenza statistica per affermare che la stessa ha avuto qualche effetto sia nel nord che nel centro (o sud). I risultati apparentemente positivi dell'esperimento esplorativo Israel-1 non sono in ogni caso stati replicati da quelli di Israel-2, che avrebbe dovuto confermare e quindi dare una piena validità al primo esperimento.

L'affidabilità dei risultati dipende dalla plausibilità fisica del modello concettuale di inseminazione che deve anticipare i risultati positivi di un aumento della precipitazione; l'applicabilità del modello concettuale d'inseminazione statica alle nubi israeliane è stata seriamente messa in dubbio dalle varie scoperte fatte sul tipo di nubi presenti e sulla situazione sinottica presente al momento dell'esperimento.

Anche i numerosi esperimenti d'inseminazione dinamica eseguiti nel resto del mondo hanno fallito nel dare solide e conclusive prove statistiche e fisiche. Nessuno degli esperimenti è riuscito ad avere un incremento della precipitazione statisticamente significativo in accordo con il loro design a priori. Le prove fisiche ottenute constano di poche misure, insufficienti, ottenute in situazioni di estrema variabilità di condizioni da nube a nube e, molte di queste misurazioni, sono state effettuate in nubi che non erano state selezionate per il trattamento durante gli esperimenti.

Le ricerche e gli esperimenti d'inseminazione statica e dinamica hanno sicuramente fornito alcune importanti intuizioni sullo sviluppo della precipitazione "fredda" e sul possibile effetto dell'inseminazione glaciogena su di essa. Alcune analisi eseguite dopo gli esperimenti suggeriscono effetti positivi dell'inseminazione glaciogena sotto ristrette e particolari condizioni meteorologiche che però non sono mai state confermate con successive sperimentazioni.

Negli esperimenti di inseminazione igroscopica invece ci sono maggiori e più evidenti risultati positivi, come nel caso dell'esperimento sudafricano e della sua seguente replica in Messico, che fanno di questa tecnica una buona prospettiva su cui investire e continuare la ricerca. Silverman (2003) fa notare che i risultati dell'esperimento messicano sarebbero stati statisticamente significativi se nel suo design fossero state specificate le stesse ipotesi statistiche dell'esperimento sudafricano. Tutti e quattro gli esperimenti d'inseminazione igroscopica analizzati hanno dato prove attraverso osservazioni fisiche e/o calcoli con modelli numerici di nubi che questa può accelerare il processo di condensazione-coalescenza e promuovere un anticipato sviluppo di gocce di dimensioni precipitanti. Nessuna osservazione fisica però è stata fatta in concomitanza del trattamento e nessun esperimento è riuscito a fornire prove fisiche che colleghino l'intervento di inseminazione agli aumenti di precipitazione osservati.

Rispetto alla tecnica glaciogena si è visto, anche tramite modelli numerici (Reisen et al. 1996), che l'inseminazione igroscopica può essere molto più produttiva nell'aumento della precipitazione in nubi convettive e può essere anche più facilmente applicabile poiché la finestra temporale in cui operare è più grande.

I prossimi esperimenti dovrebbero essere preceduti da misurazioni fisiche preposte allo sviluppo d'ipotesi fisiche rilevanti e dimostrabili per le nubi nell'area sperimentale selezionata. Lo sviluppo e la valutazione di queste ipotesi dovrebbero essere fortemente supportati dall'uso di modelli numerici in grado di coprire tutte le scale di interazione previste, cosa che ha avuto un ruolo secondario in tutti gli esperimenti passati. Le ipotesi fisiche dovrebbero essere la base per formulare ben definite ipotesi statistiche e un successivo efficiente progetto sperimentale in grado di testarle. Se i test statistici sono affidabili, bisognerebbe poi eseguire altre misure fisiche per provare la plausibilità fisica dei risultati statistici, richiesta necessaria a verificare la relazione causa-effetto fra l'inseminazione e i risultati ottenuti, a tutte le grandezze di scala.

Nel 2003 il National Research Council americano pubblicò un resoconto intitolato "Critical Issues in Weather Modification Research" dove elencava una serie di problemi che dovevano ancora essere approfonditi nella tecnica di inseminazione di nubi glaciogena:

- la trasferibilità dei risultati da semplici sistemi nuvolosi a più larghi e complessi sistemi temporaleschi che contribuiscono alla precipitazione in larghe aree;
- il collegamento fra la formazione del ghiaccio in forti updraft in regioni con acqua liquida altamente sovraraffreddata e lo sviluppo di grandi graupel che possono rimuovere l'acqua liquida;
- il collegamento fra le recenti osservazioni di alte concentrazioni di particelle di ghiaccio, di cristalli di ghiaccio addizionali prodotti dall'inseminazione, e della loro crescita iniziale e l'aumento di precipitazione a terra;
- l'interazione fra la dinamica e la microfisica delle nubi e come possono cambiare con l'inseminazione;
- i limiti di misura dei radar convenzionali.

Secondo il punto di vista che è lecito sviluppare a seguito del presente lavoro di tesi, la continua analisi di vecchi esperimenti non potrà certo dare una risposta a queste questioni irrisolte, ma sicuramente aiuterà a comprendere più a fondo la dinamica e la microfisica delle nubi. Dagli errori fatti in passato, si comprenderà come impostare i nuovi esperimenti.

Per avere una prova física e statistica definitiva che l'inseminazione delle nubi può aumentare la precipitazione, bisognerà quindi eseguire dei nuovi esperimenti, realizzati secondo le indicazioni e le metodologie approvate da tutta la comunità scientifica.

BIBLIOGRAFIA

- Alpert P., N. Halfon, and Z. Levin, 2008: Does air pollution really suppress precipitation in Israel? *J. Appl. Meteor.*, **47**, 933–43.
- AMS, 1998: Scientific background for the AMS policy statement on planned and inadvertent weather modification. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **79**, 2773-2778.
- Cotton, W. R., 1982: Modification of precipitation from warm clouds— A review. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **63**, 146–160.
- Cotton, W. R., 1997: Weather modification by cloud seeding A status report 1989 1997. [disponibile presso http://rams.atmos.colostate.edu/gkss.html]
- Gabriel, K. R., and D. Rosenfeld, 1990: The second Israeli rainfall stimulation experiment. Analysis of precipitation on both targets. *J. Appl. Meteor.*, **29**, 1055–1067.
- Garstang, M., R. Bruintjes, R. Serafin, H. Orville, B. Boe, W. Cotton, and J. Warburton, 2005: Weather modification Finding common ground. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **86**, 647–655.
- Giuliacci, M., A. Giuliacci, e P. Corazzon (a cura di), 2005: Manuale di meteorologia. *Alpha Test*, 704 pp.
- Givati, A., and D. Rosenfeld, 2005: Separation between cloud seeding and air pollution effects, *J. Appl. Meteor.*, **44**, 1298–1314.
- Halfon, N., 2008: Spatial patterns of precipitation in Israel and their synoptic characteristics. PhD. Thesis, Dept. of Geography, University of Haifa, 185 pp.
- Halfon, N., Z. Levin, and P. Alpert, 2009: Temporal rainfall fluctuations in Israel and their possible link to urban and air pollution effects. *Environ. Res. Lett.*, 4, 025001 (12pp).
- Kessler, A., A. Cohen, and D. Sharon, 2006. *Analysis of the cloud seeding effectiveness in Northern Israel*, Report to the Israeli Water Authority, Environmental & Water Resources Eng., Haifa, 117 pp. (in Hebrew Abstract in English).
- Langmuir, I., 1962: Collected works of Irving Langmuir. Pergamon Press, 12 vol.
- Levin, Z., N. Halfon, and P. Alpert, 2010: Reassessment of rain enhancement experiments and operations in Israel. Submitted for publication on *Atmos. Res.*
- Levizzani, V., 2010: Dispense del corso di Fisica delle Nubi. Università degli Studi di Bologna.
- Nirel, R., and D. Rosenfeld, 1995: Estimation of the effect of operational seeding on rain amounts in Israel. *J. Appl. Meteor.*, **34**, 2220-2229.
- Rangno, A. L., and P. V. Hobbs, 1995: A new look at the Israeli cloud seeding experiments. *J. Appl. Meteor.*, **34**, 1169.1193.
- Rangno, A. L., and P. V. Hobbs, 1997a: Reply. J. Appl. Meteor., 36, 253-254.

- Rangno, A. L., and P. V. Hobbs, 1997b: Reply. J. Appl. Meteor., 36, 257-259.
- Rangno, A. L., and P. V. Hobbs, 1997c: Reply. J. Appl. Meteor., 36, 272-276.
- Rosenfeld, D., 1997: Comments on "A new look at the Israeli cloud seeding Experiments". *J. Appl. Meteor.*, **36**, 260-271.
- Saaroni, H., N. Halfon, B. Ziv, P. Alpert, and H. Kutiel, 2009: Links between the rainfall regime in Israel and location and intensity of Cyprus lows. *Int. J. Climatol.*, **29**, DOI:10.1002/joc.1912.
- Silverman, B. A., 2001: A critical assessment of glaciogenic seeding of convective clouds for rainfall enhancement. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **82**, 903–923.
- Silverman, B. A., 2003: A critical assessment of hygroscopic seeding of convective clouds for rainfall enhancement. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **84**, 1219-1230.
- Vonnegut, B, and H. Chessin, 1971: Ice nucleation by coprecipitated silver iodide and silver bromide. *Science*, **174**, 945–946.
- Woodley, W. L., 1997: Comments on "A new look at the Israeli cloud seeding experiments". *J. Appl. Meteor.*, **36**, 250-252.