

# UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Fisica e Astronomia “Galileo Galilei”

Corso di Laurea in Astronomia

Tesi di Laurea

Il ciclo dell’acqua sulla Terra e analogie con il ciclo del  
metano su Titano

Relatore

Prof. Sergio Ortolani

Laureanda

Federica D’Andreamatteo

Anno Accademico 2022/2023

# Introduzione

La tesi tratta del ciclo idrogeologico dell'acqua sulla Terra e delle analogie con l'idrologia del ciclo del metano su Titano.

Titano è una delle lune di Saturno e, oltre alla Terra stessa, è l'unico corpo planetario noto ad avere un liquido permanente sulla sua superficie con un ciclo idrologico attivo.

La tesi ha come obiettivo quello di rispondere principalmente ai seguenti quesiti:

- Quali sono le condizioni fisiche necessarie affinché si verifichi un ciclo idrologico dell'acqua sulla Terra e del metano su Titano?
- Quali sono le condizioni fisiche necessarie per mantenere attivo un ciclo idrologico sulla Terra e su Titano?
- Quali sono le cause dell'asimmetria emisferica dei laghi e dei mari su Titano?
- Quali sono le evidenze derivanti dalla missione Cassini-Huygens?
- Cosa comporta l'influenza solare sull'atmosfera di Titano?
- Esistono delle prerogative per avere una forma di vita su Titano?

Le tematiche sopra elencate consistono nel fulcro della tesi e rappresentano la base per comprendere le analogie e le differenze tra l'idrologia sulla Terra e su Titano.

Nello specifico nel Capitolo 1 sono analizzate la termodinamica delle transizioni di fase dell'acqua sulla Terra e l'equazione di Clausius-Clapeyron per l'atmosfera che descrive la variazione della pressione con la temperatura lungo la curva di equilibrio tra due fasi di una sostanza.

Nel capitolo 2 viene analizzato il ciclo idrologico del metano su Titano, facendo analogie su ciò che accade sulla Terra e approfondendo dal punto di vista fisico aspetti riguardanti l'atmosfera, la circolazione generale e l'idrologia di Titano.

Nel capitolo 3 sono riportati i processi lacustri/marini, fluviali e pluviali studiati tramite la missione Huygens-Cassini e le principali evidenze scientifiche derivanti da questa, l'influenza solare sull'atmosfera di Titano ed infine le prerogative per una vita su di esso.

Nel capitolo 4 seguono la conclusione e la bibliografia.

# Indice

INTRODUZIONE	1
1 CAPITOLO 1	3
1.1 Il ruolo dell'acqua nell'atmosfera	3
1.2 Equazione di Clausius-Clapeyron per l'atmosfera	4
1.3 Diagramma di fase per il vapore acqueo	5
1.4 Il vapore acqueo e il trasporto di energia dell'atmosfera	6
2 CAPITOLO 2	8
2.1 L'atmosfera di Titano	8
2.2 Idrologia su Titano	9
2.3 Ciclo del metano su larga scala su Titano e analogie con la Terra	10
2.4 Circolazione di Hadley su Titano e sulla Terra	12
2.5 La convezione umida per Titano e per la Terra	13
2.6 Impatto della topografia e del forzante orbitale	15
2.6.1 Topografia	16
2.6.2 Forzante orbitale	18
3 CAPITOLO 3	21
3.1 Evidenze derivanti dalla missione Cassini-Huygens	21
3.2 Influenza solare sull'atmosfera di Titano	25
3.2.1 L'etano e il propano sostituiranno il ciclo del metano su Titano?	26
3.3 Forme di vita su Titano	27
4 CAPITOLO 4	28
4.1 Conclusione	28
4.2 Bibliografia	30

# 1

## Capitolo 1

In questo capitolo esaminiamo la termodinamica delle transizioni di fase dell'acqua sulla Terra e l'equazione di Clausius-Clapeyron per l'atmosfera che descrive la variazione della pressione con la temperatura lungo la curva di equilibrio tra due fasi di una sostanza.

In questo capitolo usiamo questi risultati per capire le proprietà dell'acqua nell'atmosfera terrestre, ma nel prossimo si rileveranno utili per comprendere anche il ciclo del metano su Titano.

### 1.1 IL RUOLO DELL'ACQUA NELL'ATMOSFERA

La geofluidodinamica è la branca della geofisica che studia il moto dei fluidi geofisici (atmosfera e oceani) tramite leggi fisiche della fluidodinamica applicata al sistema terrestre. Quindi la fluidodinamica geofisica fornisce le basi teoriche per comprendere la circolazione dell'atmosfera e dell'oceano della Terra e più recentemente degli altri pianeti. L'acqua esiste in più fasi sulla Terra, e un ruolo fondamentale nell'atmosfera terrestre è rivestito dall'acqua sotto forma di vapore acqueo, quest'ultimo è soggetto alla condensazione ed è responsabile di quattro principali fenomeni che avvengono nella nostra atmosfera:

- formazione di nubi, che riflettono una buona frazione della radiazione solare in arrivo e intrappolano la radiazione infrarossa uscente emessa dalla superficie terrestre;
- pioggia;
- è il gas serra a più alta concentrazione in atmosfera (in media 0,33% fino ad arrivare in certi periodi al 4%) ed è quello che contribuisce maggiormente all'effetto serra (con un contributo stimato del 70%, che raggiunge il 98% se viene considerato anche l'effetto creato dalle nuvole). Nell'atmosfera, le molecole di acqua catturano il calore irradiato dalla Terra diramandolo in tutte le direzioni, riscaldando così la superficie della Terra prima di essere irradiato nuovamente nello spazio.
- rilascio di calore latente che influisce sulla circolazione dell'atmosfera (noi ci soffermeremo su quest'ultimo aspetto in questo capitolo).

Il vapore acqueo ha un ruolo fondamentale nella comprensione della circolazione della nostra atmosfera, in quanto i valori di saturazione del contenuto di vapore acqueo possono essere facilmente raggiunti nell'atmosfera terrestre. Qualsiasi gas ideale è caratterizzato da una pressione di vapore di saturazione, ma quest'ultima per gli altri principali costituenti dell'atmosfera terrestre si verifica a temperature molto elevate che normalmente non si verificano sulla Terra.

Ad esempio, l'anidride carbonica ha una pressione di vapore di saturazione di circa 56 atm a 20°C, quindi non c'è pericolo di pioggia di anidride carbonica, in quanto la pressione atmosferica terrestre non è caratterizzata da tale pressione a tale temperatura, di conseguenza non è possibile il passaggio di stato vapore-liquido.

Su Marte, invece, le basse temperature (in media circa -70°C) e la bassa pressione (circa 1% di quella terrestre) permettono durante l'inverno, quando la temperatura si abbassa fino a -150°C, la condensazione ai poli di una parte dell'anidride carbonica presente nell'atmosfera. Si formano così le calotte polari stagionali. Naturalmente mentre una calotta si condensa l'altra sublima e si instaura

uno scambio di gas fra i poli opposti del pianeta.

Su Titano la temperatura superficiale è di circa 96 K e il metano è un condensabile, dunque su di esso vi sono i presupposti fisici e chimici affinché il metano sia soggetto ai passaggi di stato, come approfondiremo e analizzeremo nel paragrafo 2.1. La condensazione del vapore acqueo (e del metano su Titano) e il concomitante rilascio di calore influiscono direttamente sui flussi di fluido nell'atmosfera.

## 1.2 EQUAZIONE DI CLAUSIUS-CLAPEYRON PER L'ATMOSFERA

Con il termine vapore acqueo si fa riferimento all'acqua nel suo stato di vapore. Esso è invisibile, inodore e incolore, ed è una delle componenti dell'atmosfera terrestre. Il vapore acqueo è il costituente variabile più importante dell'atmosfera. Se sottoposto a determinate condizioni fisiche (che discuteremo in seguito) sarà soggetto a transizioni di fase.

L'equazione di Clausius-Clapeyron descrive la variazione della pressione totale del gas con la temperatura lungo la curva di equilibrio tra due fasi di una stessa sostanza, quindi lo studio di questa equazione è fondamentale per comprendere i passaggi di fase dell'acqua sulla Terra. Per la pressione del vapore saturo dell'acqua la formula Clausius-Clapeyron ha la seguente forma:

$$\frac{de_s}{dT} = \frac{Le_s}{R_v T^2} \quad (1.1)$$

Il vapore si dice saturo quando si trova in equilibrio con lo stato liquido (acqua) e quindi a una precisa temperatura (punto di ebollizione), associata a sua volta a una specifica pressione assoluta; una variazione anche minima di temperatura è sufficiente per trasformare in vapore la fase liquida residua, o una variazione di pressione provoca lo spostamento da tale condizione.

In 1.1  $e_s$  è la pressione del vapore di saturazione per l'equilibrio del vapore dell'acqua,  $L$  è l'entalpia della vaporizzazione (spesso chiamata calore latente di vaporizzazione, circa  $2,5 \times 10^6 \text{ Jkg}^{-1}$ ),  $R_v$  è la costante universale dei gas ideali, in questo caso del vapore acqueo ( $461,5 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ), e  $T$  è la temperatura assoluta. L'entalpia di vaporizzazione (cioè il calore latente di vaporizzazione) è solo la quantità di energia necessaria per far evaporare una certa massa di acqua liquida.

La sensibilità alla temperatura di  $e_s$  è piuttosto alta. Infatti, la pressione del vapore di saturazione aumenta del 7% per ogni aumento di 1 K di temperatura. Questa elevata sensibilità ha profonde implicazioni per il tempo e il clima.

Il lato destro di 1.1 è sempre positivo, il che significa che la pressione del vapore di saturazione aumenta sempre con la temperatura (cioè,  $\frac{de_s}{dT} > 0$ ). Questa pendenza positiva ha senso perché sappiamo che quando la temperatura dell'acqua sale, l'evaporazione è più veloce (perché le molecole d'acqua hanno più energia e quindi una maggiore possibilità di rompere i legami che le tengono ad altre molecole d'acqua allo stato liquido o di ghiaccio allo stato solido).

Notiamo che il membro sinistro è scritto come una derivata totale perché, a parte una dipendenza trascurabile di  $L$  dalla pressione, il membro destro è in funzione della sola temperatura. Se consideriamo  $L$  costante (diminuisce di circa l'1% ogni 10°C di aumento della temperatura), si possono separare le variabili ( $e_s$  e  $T$ ) in 1.1 ottenendo:

$$\frac{de_s}{e_s} = \frac{LdT}{R_v T^2} \quad (1.2)$$

Ora prendendo come estremi di integrazione rispettivamente inferiore e superiore per il membro di sinistra  $e_0$  e  $e_s$ , mentre per quello di destra  $T_0$  e  $T$ , e integrando si giunge all'espressione:

$$\log\left(\frac{e_s}{e_0}\right) = -\frac{L}{R_v}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right) \quad (1.3)$$

Infine, elevando entrambi i membri esponenzialmente ed evidenziando  $e_s$  a sinistra si ottiene:

$$e_s = e_0 \exp\left[\frac{L}{R_v}\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)\right] \approx e_0 \exp\left[\frac{L}{R_v}\left(\frac{T - T_0}{T_0^2}\right)\right] = e_0 \exp(\alpha T') \quad (1.4)$$

dove  $\alpha = \frac{L}{R_v T_0^2}$  è una costante e  $T' = T - T_0$ .

L'aumento esponenziale è quantitativamente accurato solo per piccole variazioni di  $T$  intorno a  $T_0$  ma l'approssimazione vale da circa 240 K a 310 K, e al di sotto di questi valori il contenuto di vapore acqueo è in ogni caso molto piccolo. Per convenzione si considera  $T_0$  pari a 273 K (0°C) e  $e_0$  è quindi 6.11 hPa, ossia i valori di temperatura e di pressione del punto triplo dell'acqua (definito nel paragrafo successivo).

Si nota che  $e_s$  dipende solo da  $T$  (temperatura assoluta) ed è quindi indipendente dalla pressione atmosferica o da qualsiasi altro fattore.

In meteorologia, la formula di Clausius-Clapeyron è comunemente usata in diagrammi termodinamici per il calcolo delle energie di cambiamento di fase dell'acqua atmosferica. I cambiamenti di fase possono essere rappresentati in un diagramma pressione-temperatura (PT) e le linee che separano le diverse fasi sono dette curve di coesistenza.

Prima di analizzare il diagramma di fase vediamo come si trasforma l'equazione di Clausius-Clapeyron nel passaggio da vapore a ghiaccio. L'equazione di base è sempre la stessa a meno di una costante:

$$e_{si} = e_0 \exp\left[\frac{L_s}{R_v}\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (1.5)$$

dove  $e_{si}$  è la pressione del vapore di saturazione per l'equilibrio del vapore del ghiaccio e  $L_s$  è l'entalpia di sublimazione (scambio diretto tra acqua solida e vapore corrisponde a  $2,834 \times 10^6 \text{ Jkg}^{-1}$ ).

Per i due casi analizzati sostituendo i valori si ottiene quindi:

$$e_s = e_0 \exp\left[(6808K)\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right) - 5,09 \ln \frac{T}{T_0}\right] \quad (1.6)$$

$$e_{si} = e_0 \exp\left[(6293K)\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right) - 0,555 \ln \frac{T}{T_0}\right] \quad (1.7)$$

dove  $T_0 = 273\text{K}$  e  $e_0 = 6,11 \text{ hPa}$ .

Si noti che  $e_0$  è la pressione di saturazione del vapore a  $T_0$ . Si noti come le costanti siano leggermente diverse perché il calore latente di vaporizzazione per l'acqua liquida è nettamente più basso rispetto al calore latente di vaporizzazione per il ghiaccio ( $2.2 \times 10^6 \text{ J/Kg}$  contro  $3.3 \times 10^8 \text{ J/Kg}$ ). Si noti che  $T$  in queste equazioni è in Kelvin.

### 1.3 DIAGRAMMA DI FASE PER IL VAPORE ACQUEO

L'acqua è vapore quando la pressione del vapore acqueo è abbastanza bassa e la temperatura (e quindi la pressione del vapore di saturazione) è abbastanza alta da far evaporare tutta l'acqua nel sistema e nella fase vapore.

Nell'atmosfera possono esistere condizioni per le quali la pressione e la temperatura dell'acqua si

trovano nella parte liquida o talvolta solida del diagramma di fase. Queste condizioni sono instabili e ci sarà condensazione o deposizione fino a quando la condensazione e l'evaporazione o la sublimazione e la deposizione non entreranno in equilibrio. Pertanto, più acqua passerà alla fase liquida o ghiacciata in modo che la pressione del vapore acqueo scenda fino al valore di saturazione.

Possiamo ora disegnare il diagramma di fase per l'acqua.

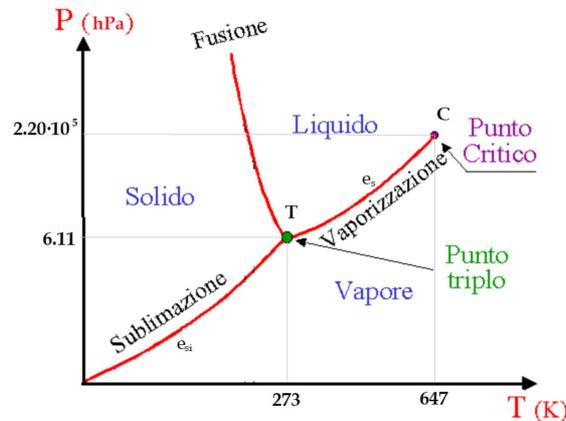


Figura 1.1: Diagramma di fase per l'acqua: il grafico mette in relazione la pressione totale (hPa) e la temperatura (K). Nel grafico sono state evidenziate le curve  $e_s$  ed  $e_{si}$  e i punti T (punto triplo) e C (punto critico) che discuteremo in questo paragrafo. Ricordiamo (come precedentemente discusso) che  $e_s$  è la pressione di saturazione (cioè la pressione di equilibrio) tra liquido e vapore e  $e_{si}$  è la pressione di saturazione tra vapore e ghiaccio.

Lungo la linea  $e_s$  vapore e liquido sono in equilibrio e l'evaporazione bilancia la condensazione. Lungo la linea  $e_{si}$ , vapore e ghiaccio sono in equilibrio e la sublimazione equivale alla deposizione.

Il punto critico (C) designa le condizioni di massima temperatura e di massima pressione in corrispondenza delle quali una sostanza può esistere come miscela bifase gas-liquido, detto in altri termini al di sopra di tale punto (in temperatura) non si può ottenere il liquido a nessun valore di pressione per quanto elevata.

Per l'acqua la temperatura critica è di 647 K e la pressione critica di 22,06 MPa. Gli stati di equilibrio in cui coesistono due fasi (solido-vapore, solido-liquido, liquido-vapore) stanno su tre curve che si incontrano nel punto triplo T, dove coesistono tutte e tre le fasi ( $p = 6,11$  hPa;  $T = 273,14$  K).

La linea che separa la fase solida dalla fase liquida, linea di fusione, ha pendenza negativa: ciò vuol dire che aumentando la pressione diminuisce la temperatura di fusione. Le altre linee di separazione, linea di sublimazione e linea di evaporazione, hanno sempre pendenza positiva.

Dal diagramma si vede che a pressione costante e aumentando la temperatura (trasformazione isobara parallela all'asse  $T$ ) si possono avere tre tipi di comportamento: se  $p < p_t$  si ha il passaggio solido-vapore, se  $p_t < p < p_c$  si hanno due cambiamenti di fase, solido-liquido e liquido-vapore, se  $p > p_c$  si ha la fusione, ma il passaggio da liquido a gas avviene senza evaporazione. Invece, a temperatura costante e aumentando la pressione (trasformazione isoterma parallela a  $p$ ) è possibile passare dalla fase di vapore alla fase liquida e solida solo se  $T < T_c$ , mentre per  $T > T_c$  la sostanza resta sempre gassosa, qualsiasi sia la pressione.

## 1.4 IL VAPORE ACQUEO E IL TRASPORTO DI ENERGIA DELL'ATMOSFERA

Le transizioni di fase sono anche responsabili di una grande quantità di trasferimento di calore nell'atmosfera. Infatti, l'evaporazione dell'acqua richiede energia, il calore latente dell'evaporazione viene

a sua volta restituito all'atmosfera per condensazione. Quindi il vapore è un mezzo di stoccaggio e trasporto di energia. Il calore latente è uno dei fattori più importanti che contribuiscono al ciclo energetico globale.

Quando l'acqua si condensa, viene rilasciato calore latente e la temperatura dell'aria circostante aumenta di conseguenza

$$c_p \Delta T = L \Delta q \quad (1.8)$$

dove  $c_p$  è la capacità termica dell'aria a pressione costante. Pertanto, per un piccolo cambiamento di temperatura, la pressione del vapore di saturazione e l'umidità specifica di saturazione cambiano secondo

$$\frac{\Delta q_s}{q_s} = \frac{\Delta e_s}{e_s} = \alpha \Delta T \quad (1.9)$$

dove l'umidità specifica  $q$  è il rapporto tra la densità del vapore e quella dell'aria ed è correlata alla tensione di vapore  $e$  da

$$q = \frac{\epsilon e}{p - e(1 - \epsilon)} \approx \epsilon \frac{e}{p} \quad (1.10)$$

vale la seconda espressione a destra quando  $e \ll p$  e  $\epsilon \approx 0,62$  è il rapporto tra la costante dei gas dell'aria secca e quella dell'umidità. A pressione costante il valore di saturazione dell'umidità  $q_s$  aumenta approssimativamente esponenzialmente con la temperatura. L'umidità specifica è particolarmente utile perché in assenza di condensa o evaporazione si conserva materialmente; cioè  $Dq/Dt = 0$ . Una particella può saturarsi spostandosi a una temperatura inferiore (conservando  $q$ , ma con  $e_s$  in calo) o spostandosi a una pressione più elevata (conservando  $q$  ed  $e_s$ , ma con  $q_s$  in calo).

Dopo aver introdotto questi concetti possiamo procedere applicandoli all'atmosfera di Titano.

# 2

## Capitolo 2

In questo capitolo studieremo il ciclo idrologico del metano su Titano, facendo analogie su ciò che accade sulla Terra e approfondiremo dal punto di vista fisico aspetti riguardanti l'atmosfera e la circolazione generale di Titano. In aggiunta un paragrafo sarà dedicato alla convezione umida ed infine ci focalizzeremo su come l'idroclima sia influenzato dalla topografia e dal forzante orbitale.

### 2.1 L'ATMOSFERA DI TITANO

Titano è una luna di Saturno e a parte la Terra stessa, è l'unico corpo planetario noto per avere un liquido permanente sulla sua superficie e, crediamo, un ciclo idrologico attivo.

L'atmosfera di Titano è composta per il 98,4% da azoto, per l'1,4% da metano e per 0,1%-0,2% da idrogeno. Ci sono inoltre tracce di idrocarburi, come etano, diacetilene, propano e altri gas, come il cianoacetilene, l'acido cianidrico, il diossido di carbonio, il cianogeno, l'argon e l'elio. Questi idrocarburi si pensa che formano quello "spesso smog arancione" nella parte superiore dell'atmosfera di Titano a partire dalla rottura del metano a causa della luce ultravioletta solare.

Il metano su Titano condensa ad altitudini superiori a 8 km nella regione equatoriale e parecchi chilometri più in basso ai poli. Il metano condensato è un liquido alla temperatura superficiale equatoriale di 94 K, ed è completamente congelato solo al di sopra di 14 km di altitudine grazie alla depressione del punto di congelamento offerta dall'azoto atmosferico (Lorenz & Lunine 2002).

Alla temperatura superficiale di Titano (94 K) il ghiaccio d'acqua non sublima, e per questo motivo l'atmosfera titaniana è priva di vapore acqueo. Le nubi sparse che generano la foschia caratteristica del satellite e che danno a Titano il suo tipico colore verde sono probabilmente composte di metano, etano o altri composti organici semplici.

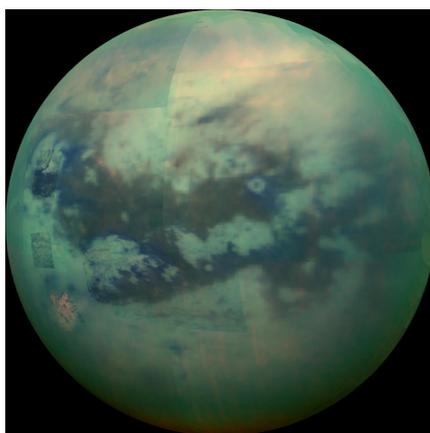


Figura 2.1: Questa immagine di Titano deriva dalla missione Cassini-Huygens e lo strumento utilizzato per ottenerla è stato lo spettrometro di mappatura visiva e infrarossa.

Il punto triplo del metano è a 90,7 K e il punto di ebollizione del metano è di circa 117 K sulla superficie di Titano, dove la pressione è di circa 1,5 bar. Pertanto, il metano sarà in forma liquida in superficie, e in effetti si osservano laghi, in modo più evidente alle alte latitudini settentrionali (almeno

attualmente). Questo metano evapora nell'atmosfera dove può condensarsi e ricadere in superficie, formando un ciclo idrologico.

Segue il diagramma di fase del metano, da questo è possibile analizzare le curve che delineano i vari stati di aggregazione, osservare le temperature e le pressioni che caratterizzano i vari stati nel quale il metano si può trovare su Titano e le condizioni che si devono verificare affinché avvenga un cambiamento di stato o una coesistenza di stati.

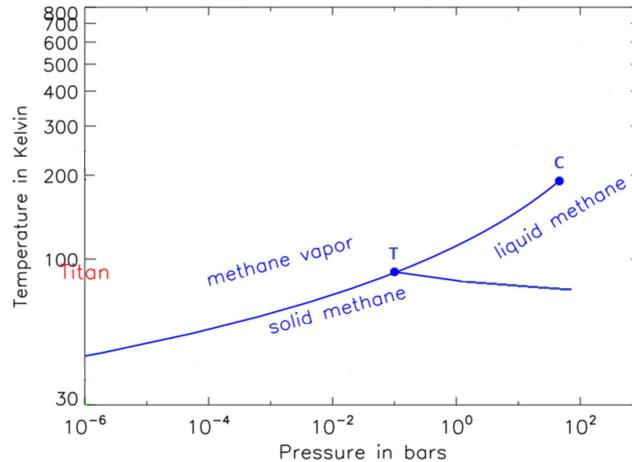


Figura 2.2: Il diagramma di fase per il metano: il grafico mette in relazione la temperatura in Kelvin con la pressione totale del metano in bar (1 bar =  $\times 10^4$  Pascal). Sono stati evidenziati il punto triplo (T) e il punto critico (C), e le curve che dividono i vari stati della materia.

La linea che separa la fase solida dalla fase liquida, linea di fusione, ha pendenza negativa: ciò vuol dire che aumentando la pressione diminuisce la temperatura di fusione. Le altre linee di separazione, linea di sublimazione e linea di evaporazione, hanno sempre pendenza positiva, in modo analogo al caso in Fig. 1.1.

Dal diagramma si vede che a pressione costante e aumentando la temperatura (trasformazione isobara parallela all'asse  $T$ ) si possono avere tre tipi di comportamento: se  $p < p_t$  si ha il passaggio solido-vapore, se  $p_t < p < p_c$  si hanno due cambiamenti di fase, solido-liquido e liquido-vapore, se  $p > p_c$  si ha la fusione, ma il passaggio da liquido a gas avviene senza evaporazione. Invece, a temperatura costante e aumentando la pressione (trasformazione isoterma parallela a  $p$ ) è possibile passare dalla fase di vapore alla fase liquida e solida solo se  $T < T_c$ , mentre per  $T > T_c$  la sostanza resta sempre gassosa, qualsiasi sia la pressione. Anche in questo caso come è osservabile analogamente in Fig. 1.1

In generale, esiste un ciclo idrologico in un'atmosfera planetaria se quell'atmosfera contiene un condensabile; cioè un gas che è suscettibile ai cambiamenti di fase a temperature tipiche all'interno dell'atmosfera, dalla fase gassosa a quella solida o liquida. Il ciclo idrologico sarà quindi importante in funzione sia della quantità di condensabile che del suo calore latente.

## 2.2 IDROLOGIA SU TITANO

Per determinare se è possibile un ciclo idrologico significativo su Titano, introduciamo alcune costanti utili. Per il metano il calore latente di vaporizzazione e la costante di gas specifica per il vapore acqueo sono rispettivamente  $L \approx 5 \times 10^5$  J/kg e  $R_v = 520$  Jkg<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>. Quindi usando 1.4, l'equazione approssimativa di Clausius-Clapeyron per il metano indica che la saturazione della pressione del vapore varia come  $e_s \approx e_0 \exp(-\alpha_m T')$  dove  $\alpha_m = \frac{L}{R_v T_0^2} \approx 0,12$  K<sup>-1</sup> per  $T_0 = 90$  K.

Pertanto, le concentrazioni di metano di saturazione nell'atmosfera di Titano aumentano di circa il 10% per grado Kelvin. Il gradiente termico osservato è di circa 0,7 K/km e quindi ci si può aspettare che le concentrazioni atmosferiche di metano diminuiscano di circa il 10% per chilometro, fornendo un'altezza di scala di circa 10 Km. Poiché la troposfera di Titano si estende fino a circa 40 km, la maggior parte del metano si trova nella troposfera inferiore, proprio come il vapore acqueo è sulla Terra.

Per capire se la condensazione è importante dobbiamo conoscere l'umidità specifica del metano. A 80 K la pressione del vapore di saturazione del metano è di circa 20 hPa che sale a 200 hPa a 95 K. La pressione superficiale di Titano, circa 1500 hPa, è maggiore di questa ma solo di un fattore 7 o 8, mentre sulla Terra la pressione superficiale dovuta all'aria (1000 hPa) è circa 50 volte la pressione del vapore di saturazione dell'acqua a 290 K.

Utilizzando 1.10 con il rapporto tra la costante dei gas dell'aria secca e quella dell'umidità di  $\epsilon \approx 0,5$  (per metano e azoto), si ha che l'umidità specifica alla saturazione dell'atmosfera vicino alla superficie di Titano a 95 K è quindi di circa 0,07 (70 g/kg). Questo valore elevato fa sì che gli effetti della condensazione possano essere notevoli, anche se il calore latente del metano è parecchie volte inferiore a quello dell'acqua. Se e quando si forma la condensa la temperatura cambia secondo  $\Delta T = Lq_m/c_p$  e se  $q=0.02$  si ha  $\Delta T \approx 10K$ .

Dati i suddetti valori del rapporto di miscelazione, la quantità totale di metano su Titano è di circa  $2000 \text{ kgm}^{-2}$  (Mitchell e Lora 2016). Inoltre è noto che i laghi osservati coprono solo una piccola frazione della superficie di Titano e che c'è molto più metano nell'atmosfera che in superficie, una situazione molto diversa da quella dell'acqua sulla Terra. Sono state osservate anche nubi troposferiche (Griffith et al. 2000, Roe 2012), anche se di breve durata e principalmente in estate, che variano considerevolmente con la stagione (l'anno di Titano è di circa 29,5 anni terrestri), e coprono solo una piccola frazione del globo.

Le considerazioni elementari di cui sopra suggeriscono che il ciclo del metano può essere ampio su Titano, ma non dirci che forma assume. Possiamo quindi chiederci:

1. Esiste effettivamente un ciclo del metano attivo e quali condizioni fisiche sono necessarie per mantenere un ciclo idrologico attivo su un pianeta terrestre?
2. Come interagisce il ciclo idrologico con la circolazione generale? Il ciclo idrologico è una risposta prevalentemente passiva alla circolazione o il ciclo idrologico influisce in modo significativo sulla circolazione?

## 2.3 CICLO DEL METANO SU LARGA SCALA SU TITANO E ANALOGIE CON LA TERRA

Alle domande sopra non si può rispondere con il solo ragionamento termodinamico. Il ciclo idrologico su Titano viene mantenuto dall'eccitabilità della convezione, proprio come accade ai tropici terrestri. Il mantenimento di un ciclo idrologico locale si basa in gran parte sulla capacità o meno della condensazione di creare onde gravitazionali e innescare la condensazione nelle vicinanze in modo autosufficiente. Questo a sua volta dipende dal calore latente di condensazione e dall'instabilità convettiva dello stato fondamentale.

Su Titano, c'è una circolazione su larga scala e sembra che sia questa circolazione a guidare il ciclo del metano (Mitchell 2012, Rodriguez et al. 2009). Nello specifico, c'è una circolazione di Hadley su larga scala guidata dal gradiente di insolazione polo-equatore, e a causa dell'obliquità di Titano rispetto al Sole, combinata con il suo piccolo raggio e la sua bassa velocità di rotazione, la circolazione ha una forte componente interemisferica nelle stagioni solstiziali.

Infatti nella figura 2.3 il "trasporto interemisferico netto" si riferisce al tempo impiegato per trasportare il metano da un emisfero all'altro a causa dell'asimmetria emisferica nella forzatura solare, che a sua volta varia su una scala temporale di circa 45.000 anni, mentre il "trasporto stagionale" si riferisce al trasporto interemisferico durante una stagione solstiziale (circa 10 anni terrestri).

Vi è uno squilibrio radiativo nella parte superiore dell'atmosfera che varia tra circa  $+0,5 \text{ Wm}^{-2}$  e  $-1 \text{ Wm}^{-2}$  alle alte latitudini, il che implica un flusso di energia verso i poli fino a 5 TW. (Sulla Terra, lo squilibrio radiativo è oltre 100 volte più grande di Titano, e il flusso di energia un po' meno di 1000 volte più grande, perché la Terra è un corpo planetario più grande). Questo squilibrio comporta un trasporto netto di metano dalle basse latitudini, dove l'insolazione e l'evaporazione sono elevate, alle alte latitudini dove l'insolazione e l'evaporazione sono basse (Rannou et al. 2006, Schneider et al. 2012 Lora et al. 2015).

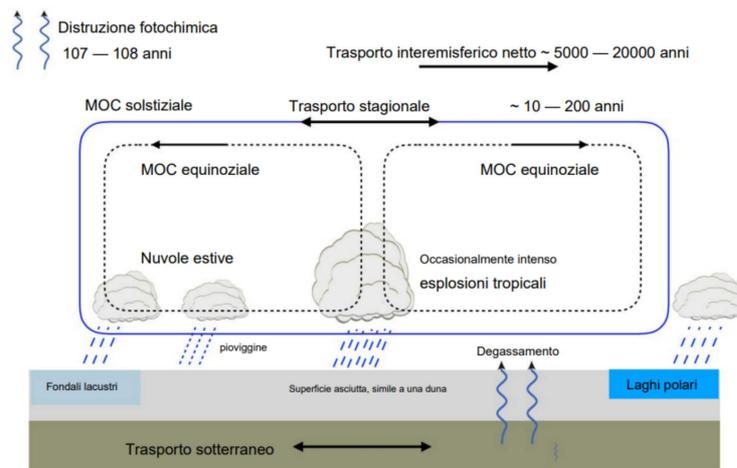


Figura 2.3: Sono rappresentati i processi e i tempi principali del ciclo del metano su Titano. I numeri (in anni terrestri) si riferiscono a quanto tempo ci vorrà perché un dato processo trasferisca o rimuova una frazione sostanziale del contenuto di metano dell'atmosfera, e sono incerti fino a un ordine di grandezza.

Un trasporto netto simile avviene sulla Terra ai tropici (anche se con differenze perché la cella di Hadley ha un'estensione meridionale limitata) ma lì l'acqua può essere restituita dagli oceani, e per quanto ne sappiamo non ci sono oceani su Titano. Seguirà nel paragrafo successivo un piccolo excursus sulla circolazione che avviene ai tropici sulla Terra, per andare ad analizzare le principali analogie e differenze con quella che avviene su Titano.

Uno squilibrio radiativo superficiale di  $+0,5 \text{ Wm}^{-2}$  corrisponde, se ampiamente bilanciato dall'evaporazione, a un tasso di precipitazione di circa 7 cm/anno, il che significa che qualsiasi particolare colonna atmosferica (contenente circa 5 metri equivalenti di metano liquido) diventerebbe completamente asciutta in un arco temporale di poco meno di 100 anni se non reintegrata dall'evaporazione. Ora, altre stime per le precipitazioni (Barth e Toon 2006, Tokano et al. 2006) sono molto più piccole e, se accurate, queste stime estenderebbero la scala temporale dell'essiccazione fino a un ordine di grandezza.

In ogni caso, l'implicazione è che il metano su Titano dovrebbe alla fine riunirsi dove le precipitazioni superano l'evaporazione su scale temporali di centinaia o forse migliaia di anni, che possono sembrare lunghe ma per gli standard planetari sono piuttosto brevi. Su Titano, ci aspetteremmo che il metano si aggregi tutto su uno o entrambi i poli.

Se la Terra non avesse bacini oceanici, probabilmente si verificherebbe un fenomeno simile, ma su una scala temporale più rapida. Un'utile equivalenza approssimativa per l'acqua è che un flusso evaporativo di  $100 \text{ Wm}^{-2}$  corrisponde a circa 1 m/anno di evaporazione o precipitazione. Ora, una

colonna atmosferica può contenere nell'ordine di dieci centimetri di acqua liquida equivalente (molto meno al di fuori dei tropici), così che se la superficie fosse asciutta il tempo di asciugatura dell'atmosfera terrestre sarebbe dell'ordine di un anno o meno. I tempi sarebbero molto più lunghi se il terreno contenesse acqua, a seconda di quanta acqua presente.

Questi argomenti suggeriscono che se un pianeta ha una circolazione su larga scala, ma nessun trasporto terrestre del liquido condensabile, allora il ciclo idrologico, si estinguerà.

Tuttavia le prove di un ciclo attivo del metano su Titano sono mostrate in figura 2.3. Laghi contenenti metano liquido sono stati osservati alle alte latitudini settentrionali dalla missione Cassini-Huygens (Stofan et al. 2007), e il Kraken Mare, situato a circa  $68^\circ$  N, potrebbe essere il più grande lago del Sistema Solare, compresi quelli sulla Terra. Nubi di metano sono state osservate sopra il Polo Sud durante la sua estate (Brown et al. 2002), e occasionali esplosioni di nubi sono state osservate nella regione equatoriale di Titano (Schaller et al. 2009). Queste varie osservazioni sono coerenti con l'idea che sia la circolazione globale a controllare in gran parte il ciclo del metano e la produzione di nubi.

## 2.4 CIRCOLAZIONE DI HADLEY SU TITANO E SULLA TERRA

Andiamo ora ad analizzare le analogie che vi sono tra la circolazione su Titano e sulla Terra, essendo la circolazione su Titano a larga scala come precedentemente detto e molto simile a quella che vi è ai tropici della Terra.

La circolazione che interessa i tropici è chiamata circolazione di Hadley, il nome è stato assegnato in onore di George Hadley, un avvocato inglese e meteorologo amatoriale del 1700, che per primo interpretò correttamente la causa della direzione prevalentemente verso occidente degli alisei nelle regioni subtropicali.

Il modello di circolazione atmosferica è basato su celle convettive disposte simmetricamente in ciascuno dei due emisferi e la cella di Hadley è uno dei meccanismi più importanti nella regolazione della circolazione atmosferica. In generale, la Terra vede una circolazione generale illustrata dalla sottostante figura.

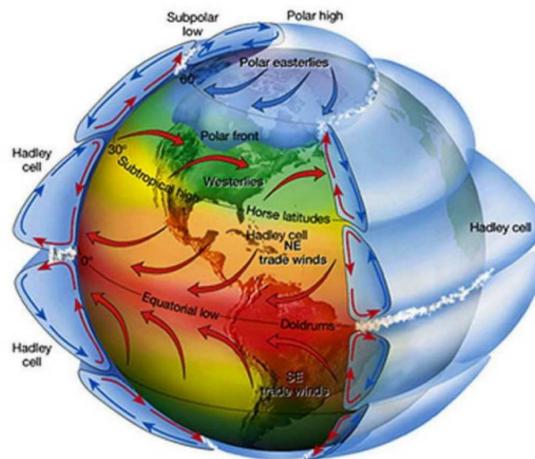


Figura 2.4: Si possono distinguere le celle di Hadley alle basse latitudini, le celle di Ferrel a latitudini intermedie e ai poli le celle polari.

Abbiamo già discusso dell'importanza del trasporto di calore nell'atmosfera e dello squilibrio radiativo in base alla latitudine, quest'ultimo è dovuto dall'irradiazione da parte del Sole non uniforme: le regioni polari ricevono in media molta meno energia delle regioni equatoriali sulla Terra e una parte di questa radiazione viene ulteriormente riflessa nello spazio dalla superficie coperta di ghiacci e nevi. Inoltre, le regioni tropicali, assorbono più energia di quanta ne emettono, mentre per le zone a grandi latitudini vale l'opposto. È quindi necessario che l'atmosfera permetta un consistente trasporto di

energia, sotto forma di calore, dall'equatore verso i poli.

All'equatore l'atmosfera di Titano riceve una notevole quantità di energia tramite l'insolazione, l'aria riscaldandosi diverrà meno densa e quindi tenderà a salire ad una velocità relativamente elevata. La corrente ascendente che si origina comporta la formazione di una regione di bassa pressione al suolo ma di alta pressione in quota. Il gradiente di pressione spingerà le masse d'aria in direzione dei poli (sia nord, sia sud) dove la pressione è minore. In queste regioni l'aria si raffredderà (per via di un minore apporto di energia) e sprofonderà fino al suolo in prossimità delle regioni polari generando aree di alta pressione sulla superficie. Come avviene per l'aria in quota, questa tenderà a spostarsi verso regioni in cui la pressione è minore, quindi verso l'equatore. In questo modo si instaura un ciclo chiuso che trasporta energia dalle regioni più calde a quelle più fredde (Rohli Vega 2018; Held 2000). Questo meccanismo è detto "meccanismo termico".

L'attuale modello della circolazione atmosferica per quanto riguarda la Terra non è basato su una singola cella per emisfero, ma ben tre: la cella di Hadley, la cella di Ferrel e la cella Polare. Il meccanismo tramite il quale si forma la prima di queste è analogo a quanto descritto precedentemente.

La differenza fondamentale risiede nel fatto che le masse d'aria calda in quota non raggiungono i poli, ma si raffreddano, mentre viaggiano in direzione latitudinale allontanandosi dall'equatore, fino a sprofondare al suolo ad una latitudine di circa  $30^\circ$  (sia nell'emisfero nord sia in quello sud). L'effetto della rotazione terrestre e dell'elevato gradiente termico tra i poli e l'equatore, quindi, impedisce la formazione di un'unica grande cella emisferica.

## 2.5 LA CONVEZIONE UMIDA PER TITANO E PER LA TERRA

Abbiamo già discusso dell'importanza della convezione per la circolazione atmosferica su Titano e sulla Terra. Pertanto, al fine di migliorare la nostra comprensione del clima terrestre contemporaneo e del clima planetario più in generale, è evidente la necessità di approfondire e generalizzare la nostra comprensione della fisica convettiva umida. La convezione umida, cioè la convezione accoppiata ai cambiamenti di fase di una sostanza condensabile, influisce sull'evoluzione passata e presente della maggior parte delle atmosfere del sistema solare, tra cui Titano (Schneider et al. 2012).

Ci sono due paradigmi su come il vigore della convezione umida dipenda dalle condizioni termodinamiche. Il primo paradigma, che possiamo chiamare "rinvigorimento guidato dal riscaldamento", afferma che il vigore convettivo umido aumenta con la temperatura superficiale. Come mostrato da Romps (2016), l'aumento del CAPE (energia potenziale disponibile convettiva) è esso stesso attribuibile al ridimensionamento di Clausius-Clapeyron dell'umidità specifica di saturazione vicino alla superficie. Pertanto, la catena di causalità nel paradigma del "rinvigorimento guidato dal riscaldamento" è: aumento della temperatura superficiale  $T_s$   $\rightarrow$  aumento dell'umidità  $\rightarrow$  aumento del CAPE  $\rightarrow$  aumento del vigore convettivo.

Il secondo paradigma per il vigore convettivo è rilevante per atmosfere in cui la componente condensabile è altamente non diluita. In queste condizioni Ding & Pierrehumbert (2016) e Pierrehumbert & Ding (2016) hanno sostenuto che la curva di Clausius-Clapeyron detta una relazione uno a uno tra pressione e temperatura. Quindi la linea di ragionamento nel "limite del vapore puro" è: umidità molto alta  $\rightarrow$  rapporto uno e uno tra  $T$  e  $p$   $\rightarrow$  basso vigore convettivo.

Generalizziamo ora la nostra comprensione del vigore convettivo umido colmando il divario tra questi due paradigmi. Il nostro approccio consiste nel simulare un'ampia gamma di atmosfere planetarie che differiscono sensibilmente dalla Terra contemporanea in termini di temperatura superficiale, pressione superficiale, costante gravitazionale e composizione. Queste atmosfere coprono lo spazio dei parametri che ci permettono di sondare continuamente il comportamento di transizione tra i due paradigmi per

il vigore convettivo.

Le simulazioni fatte sono composte da tre esperimenti, i risultati portano le previsioni di una teoria analitica per l'equilibrio radiativo-convettivo (RCE). La teoria analitica di R16 (Romps 2016) predice il CAPE medio di un'atmosfera convettiva e coglie l'evoluzione boom-bust del CAPE in tutti e tre gli esperimenti, fornendo il ponte teorico tra i regimi di "rinvigorismento guidato dal riscaldamento" e il regime di "limite del vapore puro".

Il primo esperimento (EarthTemp) consiste nella configurazione di un modello simile alla Terra, con la pressione superficiale totale fissata al valore di  $10^5$  Pa e la temperatura superficiale variabile da 275 K a 365 K. Nel secondo esperimento (EarthPressure) la temperatura superficiale del modello simile alla Terra è stata invece fissata a 300 K mentre la pressione superficiale variava da 1/16 a 8 volte il valore attuale. Il terzo esperimento ha utilizzato la configurazione Titan-like del modello con la pressione superficiale fissata al valore contemporaneo di  $1.467 \times 10^5$  Pa e la temperatura superficiale variabile da 80 a 110 K.

Inoltre sono state considerate le seguenti approssimazioni 1) sia l'aria secca che il vapore condensabile sono trattati come gas ideali, 2) si presume che le capacità termiche di tutti i componenti non dipendano dalla temperatura e 3) si presume che i condensati abbiano un volume specifico pari a zero (Ambaum 2010; Romps 2008, 2021). E per di più usiamo un trattamento semplificato della componente condensabile trascurando la fase solida, che non è di primaria importanza per la dinamica convettiva nei tropici della Terra (Seeley Romps 2016).

Nella Fig. 2.5 si osserva come la crescita e il declino del CAPE con l'aumento della temperatura sembra collegare i regimi precedentemente menzionati di "rinvigorismento guidato dal riscaldamento" e "limite del vapore puro" nell'esperimento EarthTemp. Il CAPE varia in EarthPressure qualitativamente allo stesso modo di EarthTemp, raggiungendo l'effettivo vigore convettivo nel picco, dove si ha una pressione superficiale intermedia.

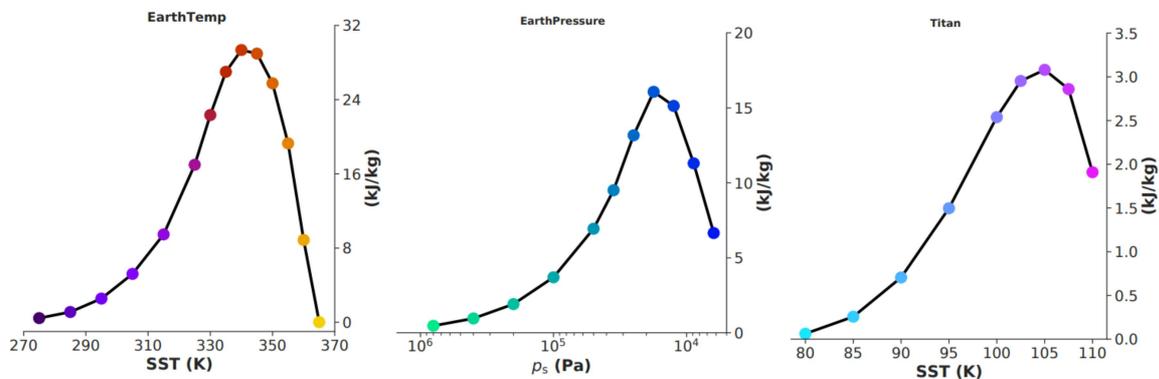


Figura 2.5: Nei grafici possiamo osservare l'andamento del CAPE (misura la galleggiabilità integrata di una particella adiabatica) rispettivamente per quanto riguarda l'esperimento EarthTemp, EarthPressure e Titan-like.

L'evoluzione boom-bust del CAPE osservata negli esperimenti EarthTemp e EarthPressure non è attribuibile solo per la convezione umida simile alla Terra, ma in qualsiasi atmosfera con un serbatoio superficiale sufficientemente grande di una specie condensabile, il condensabile diventerà sempre più volatile con il riscaldamento e alla fine arriverà a dominare la composizione atmosferica.

A quali altre atmosfere planetarie potrebbe applicarsi questo comportamento del CAPE boom-bust? Un candidato naturale è Titano. Pertanto, passiamo ora all'esperimento Titan-like, il quale presuppone condizioni termodinamiche e composizione atmosferica simile a Titano. Dalla Fig. 2.5 si osserva che analogamente agli esperimenti precedenti il modello Titan-like mostra un picco nel CAPE. L'ef-

fettivo vigore convettivo raggiunge il picco ad una temperatura superficiale di circa 95 K, molto vicina all'attuale temperatura superficiale di Titano.

Il CAPE e il vigore convettivo in tutti e tre gli esperimenti raggiungono il picco quando l'aria di base delle nubi contiene circa il 10% della componente condensabile in massa. Pertanto, possiamo concludere che il regime di "rinvigorismento guidato dal riscaldamento" termina con umidità intermedia, ben prima che queste atmosfere si avvicinino al limite del vapore. Presi tutti insieme, i nostri tre esperimenti principali indicano un fenomeno potenzialmente comune nelle atmosfere terrestri: la convezione umida è più vigorosa a umidità atmosferica intermedia.

## 2.6 IMPATTO DELLA TOPOGRAFIA E DEL FORZANTE ORBITALE

Su Titano è evidente un'asimmetria emisferica dei laghi e dei mari, un'ipotesi prevalente postula che le asimmetrie dell'insolazione stagionale, causate dall'orbita eccentrica di Saturno, portino a differenze nelle precipitazioni nette sui due poli, forse mediate dal trasporto atmosferico asimmetrico dell'umidità. Ma sono state prese in considerazione anche le variazioni topografiche.

Su scale temporali lunghe, l'asimmetria dell'insolazione stagionale è stata proposta per spiegare la distribuzione asimmetrica dei liquidi superficiali: i grandi mari di Titano e la stragrande maggioranza dei piccoli laghi si trovano nel nord.

Infatti, Lora et al. (2014) hanno mostrato che una differenza superficiale di metano tra emisferi in quattro simulazioni GCM paleoclimatiche corrisponde al contrasto emisferico nel picco di insolazione causato da cambiamenti nei parametri orbitali.

Altri studi hanno analogamente scoperto che la moderna configurazione orbitale, con il perielio che si verifica vicino al solstizio d'estate settentrionale, porta a un accumulo netto di metano nel nord. Lora e Mitchell (2015) hanno inoltre dimostrato che il trasporto verso l'equatore da parte dei vortici atmosferici è asimmetrico, fornendo un meccanismo di traslazione.

La mappatura geomorfologica delle regioni polari di Titano suggerisce che aree approssimativamente uguali nei due emisferi sono costituiti da bassi bacini, pieni a nord ma vuoti a sud. Ma depositi evaporitici, presenti nei bacini settentrionali e nelle sponde dei laghi, sono assenti nelle regioni polari meridionali. Pertanto, se il metano scorre tra i poli sulla scala temporale dei cicli precessionali, allora le evaporiti nel sud non ci dovrebbero essere, il che implica che uno svuotamento completo dei laghi e dei mari meridionali non si sta verificando al momento, ma si sono verificati nel recente passato.

Una chiara alternativa è che tali liquidi non sono mai esistiti negli ultimi  $10^4$  anni, ovviando alla necessità di un meccanismo di trasporto netto da polo a polo, e che la formazione del bacino era molto più antica.

Tokano (2019) ha utilizzato un GCM che incorpora proprietà superficiali eterogenee (topografia, albedo, emissività e inerzia termica) per suggerire che una circolazione meridionale asimmetrica, forzata in particolare dalla topografia superficiale, ostacola le precipitazioni nell'emisfero meridionale ed è quindi il principale motore di qualsiasi asimmetria. Ciò suggerirebbe che la distribuzione lacustre di Titano resiste a qualsiasi influenza della forzatura orbitale, e quindi potrebbe non essere cambiata significativamente su una scala minore di  $10^5$  anni.

D'altra parte, Faulk et al. (2020) ha recentemente accoppiato un modello idrologico e GCM, consentendo per la prima volta una simulazione completamente autoconsistente del ciclo del metano che ha dimostrato l'importanza del metano sotterraneo nel consentire l'umidità superficiale ad alta latitudine. Tuttavia, tale modello non tiene conto esplicitamente dell'influenza diretta della topografia sull'atmosfera, quindi valutazione di tale influenza sulla risultante circolazione meridionale non era

possibile. Il presente studio affronta questa lacuna.

Presentiamo ora il risultato di nuove simulazioni con l'accoppiata GCM e idrologia (Faulk et al., 2020), in cui la topografia interagisce completamente con l'atmosfera. Valutiamo l'influenza di questa interazione nel contesto dell'idroclima, compresa l'idrologia superficiale e sotterranea. E testiamo l'importanza relativa delle asimmetrie di insolazione stagionale del forzate orbitale nel trasporto globale di metano, e la conseguente distribuzione di laghi e mari.

### 2.6.1 TOPOGRAFIA

Iniziamo studiando l'impatto della topografia come condizione al contorno per l'atmosfera nelle simulazioni utilizzando la moderna configurazione orbitale effettiva di Titano (in altre parole, l'orbita di Saturno attorno al Sole).

Ci chiediamo se la topografia introduce una struttura sostanziale nei modelli idroclimatici, e se istighi o meno una circolazione di Hadley significativamente asimmetrica (Richardson e Wilson, 2002; Zalu-cha et al., 2010).

La topografia porta a grandi variazioni della pressione superficiale media - dell'ordine di decine di hPa - su scale regionali, corrispondenti alla distribuzione di valli e crinali della superficie. Infatti, poiché i bacini bassi si raggruppano a latitudini più elevate, la pressione superficiale tende ad essere più alta vicino ai poli e più bassa sugli altipiani a bassa latitudine, con l'eccezione della regione di Xanadu (circa 20°S, 240–300°E), che si pensa sia relativamente bassa, anche se montuosa (Lorenz et al., 2013; Corlies et al., 2017). Tutto ciò è in netto contrasto con il caso senza topografia, in cui le variazioni medie della pressione superficiale sono molto deboli.

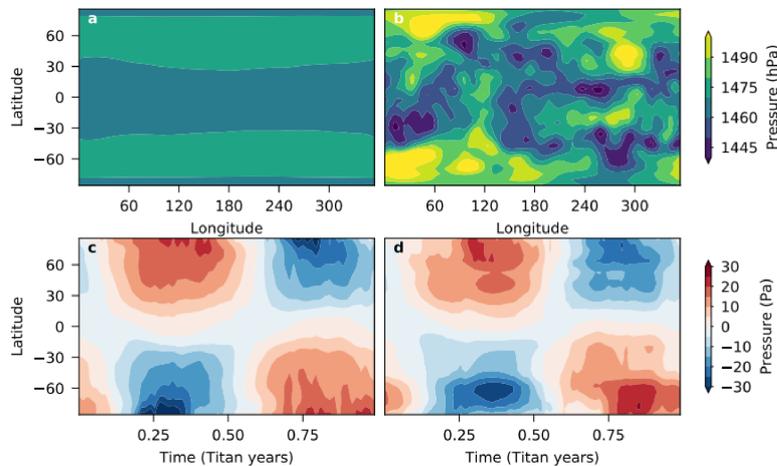


Figura 2.6: Pressioni superficiali.

Nella Fig. 2.6 sono mostrate in alto le pressioni superficiali mediate nel tempo per simulazioni (a) senza e (b) con topografia, mentre in basso l'evoluzione climatologica stagionale della pressione superficiale anomala mediata zonale per simulazioni (c) senza e d) con topografia.

Mentre la topografia influenza la distribuzione media nel tempo della massa atmosferica (come previsto, dal momento che c'è meno atmosfera sopra una montagna alta, per esempio) e corrispondentemente il vapore di metano della colonna in qualsiasi luogo, fa poco per modificare i modelli di circolazione stagionale di Titano e le variazioni di umidità rispetto al caso ben studiato senza topografia.

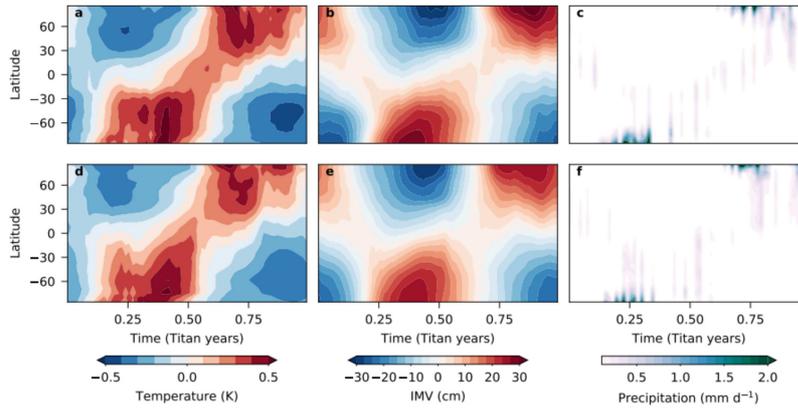


Figura 2.7: Variazioni stagionali.

Nella Fig 2.7 sono mostrate le anomalie stagionali climatologiche della temperatura superficiale (Fig. a, d) e della colonna metano integrato (Fig. b, e), si nota che non mostrano differenze apprezzabili sia in magnitudo che in tempi. Lo stesso vale per confronto della stagionalità delle precipitazioni mediate zonalmente (Fig. c, f): le precipitazioni raggiungono picchi sopra i poli estivi e si verificano sporadicamente ad altre latitudini, con un leggero, ma miglioramento costante a nord rispetto alle latitudini meridionali durante le rispettive estati. La singola differenza nelle distribuzioni delle precipitazioni è il modesto aumento dell'attività alle medie latitudini meridionali all'inizio dell'estate nella simulazione con topografia.

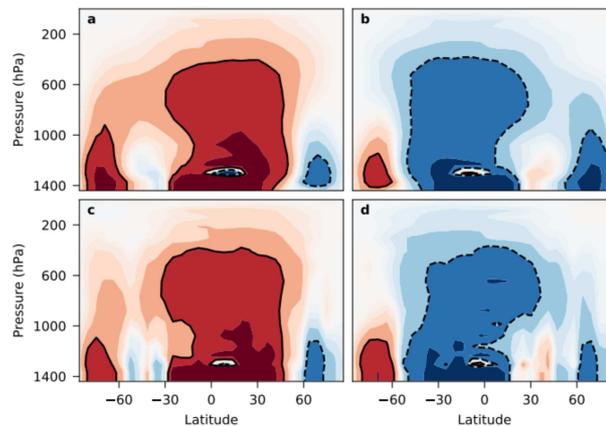


Figura 2.8: Funzione di flusso di massa meridionale.

Nella Fig. 2.8 sono mostrate le funzioni del flusso di massa meridionale mediato nel tempo nell'autunno e nell'inverno settentrionali (a, c) e nella primavera e nell'estate settentrionali (b, d) per simulazioni (a, b) senza e (c, d) con topografia.

Vi è poca indicazione di significative differenze qualitative nella circolazione meridionale dalla simulazione con topografia relativa a quella senza. In particolare, non troviamo prove di un'asimmetria emisferica indotta dalla topografia. Pertanto, scartiamo questo come un meccanismo plausibile per guidare l'asimmetria della superficie liquida su Titano.

A parità di conducibilità idraulica, la topografia porta a modesti incrementi di precipitazioni medie alle medie latitudini, oltre a un modesto calo in prossimità dell'equatore; l'impatto maggiore, tuttavia, è in declino sostanziale alle latitudini più elevate, che si avvicinano a  $2 \text{ mm Tsol}^{-1}$  ("Tsol" si riferisce a un giorno Titano) in media vicino ai poli (Fig. 2.9 a).

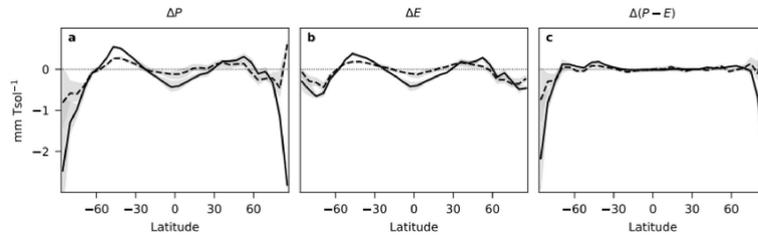


Figura 2.9: Risposte dei flussi di umidità superficiale alla topografia.

Nella Fig. 2.9 sono mostrate le differenze temporali e medie zonali in (a) precipitazioni, (b) evaporazione, e (c) precipitazione meno evaporazione tra simulazioni con e senza topografia (curve continue), nonché tra simulazioni con topografia più maggiore conduttività idraulica e senza topografia (tratteggiata curve). In tutti i casi, l'ombreggiatura grigia mostra la gamma di medie decennali negli ultimi tre decenni delle simulazioni.

La risposta di evaporazione segue da vicino quella delle precipitazioni (Fig. 2.9 b), poiché le precipitazioni consentono la successiva evaporazione da latitudini più basse. Le differenze di evaporazione tra i casi con e senza topografia suggeriscono una minore evaporazione polare nel primo, come risultato del fatto che la linea di evaporazione è più lontana verso i poli.

Le differenze nei flussi di umidità superficiale-atmosfera si annullano in gran parte alla maggior parte delle latitudini, con l'eccezione delle regioni polari (Fig. 2.9 c). Notiamo che, in media, la superficie polare meridionale ha elevazioni leggermente inferiori rispetto a quelle il bacino settentrionale, e allo stesso tempo il più profondo si trova più all'equatore rispetto ai bacini profondi del nord.

In combinazione, queste proprietà si traducono in un'asimmetria netta delle precipitazioni nord-sud, ma solo nel caso in cui la conduttività idraulica sia abbastanza elevata da rendere stabili i liquidi superficiali polari per lunghi periodi. Questi impatti non dipendono dalle asimmetrie della circolazione meridionale.

I nostri risultati qui suggeriscono che la topografia in effetti migliora localmente le precipitazioni. In breve, le precipitazioni sono aumentate (diminuite) in alta (bassa) elevazione e aumentano alle medie latitudini (in entrambi gli emisferi) a causa della topografia, ma nulla di tutto ciò ha ovvie conseguenze sulla distribuzione dei liquidi superficiali.

## 2.6.2 FORZANTE ORBITALE

La distribuzione latitudinale dei liquidi superficiali nelle nostre simulazioni con la moderna configurazione orbitale di Titano è in gran parte determinata dall'idrologia superficiale e solo indirettamente influenzata dalla topografia sull'atmosfera. L'obiettivo primario è capire se le asimmetrie stagionali dovute all'eccentricità dell'orbita di Saturno producano un effetto di primo o secondo ordine nel nostro modello accoppiato atmosfera-superficie.

Sono mostrati i flussi netti di umidità atmosferica di tre simulazioni con moderna configurazione orbitale in Fig. 2.10. Nel caso senza topografia consiste nel trasporto di umidità verso i poli alle alte latitudini e trasporto verso l'equatore alle medie latitudini, con un'asimmetria emisferica che si traduce in trasporto cross-equatoriale e convergenza nell'emisfero settentrionale; questi risultati sono abbastanza simili al caso idealizzato descritto in Lora e Mitchell (2015), anche nella loro grandezza. La topografia introduce un notevole rumore nelle curve del flusso netto di umidità.

In entrambi i casi, le asimmetrie emisferiche sono difficili da vedere, sebbene il trasporto verso il polo sia un po' più forte alle alte latitudini settentrionali rispetto a quelle meridionali.

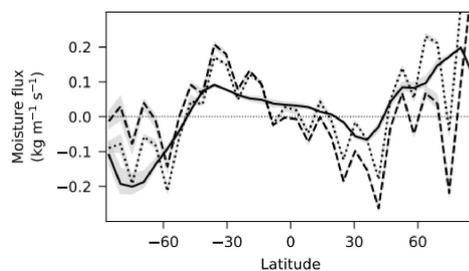


Figura 2.10: Flussi di umidità meridionali.

Nella Fig. 2.10 sono mostrati i flussi atmosferici di umidità medi temporali e zonali da simulazioni senza topografia (curva continua), con topografia (curva tratteggiata) e con topografia e maggiore conduttività idraulica (curva tratteggiata). In tutti i casi, l'ombreggiatura grigia mostra l'intervallo delle medie decennali negli ultimi tre decenni delle simulazioni. I valori positivi indicano il trasporto verso nord.

Il trasporto totale di umidità atmosferica è significativo e rappresenta un flusso di massa verso nord di metano di circa un ordine di grandezza più grande della massa presente in liquidi superficiali. Naturalmente, questo non corrisponde all'effettivo trasporto di massa da polo a polo, e invece principalmente riflette il fatto che la maggior parte del metano osservabile su Titano è nell'atmosfera. Tuttavia, il flusso di umidità dell'atmosfera risponde chiaramente all'asimmetria stagionale indotta dalla configurazione orbitale.

D'altra parte, le distribuzioni latitudinali delle differenze nel trasporto di umidità atmosferica prodotte da simulazioni con una longitudine invertita del perielio forniscono un'immagine meno consistente (Fig. 2.11). In tutti i casi, queste differenze sono negative alle latitudini inferiori, indicando un trasporto netto più verso sud nel caso del perielio invertito. Tuttavia, il trasporto differenziale ai poli è più complicato. In particolare, esiste un aumento del trasporto marginale (Fig. 2.11 a, b) o robusto (Fig. 2.11 c) verso nord al polo sud, suggerendo una divergenza leggermente aumentata del metano dalle regioni polari meridionali sottostanti il perielio invertito. Ancora una volta, questo potrebbe riflettere l'importanza della distribuzione latitudinale dei bacini polari, che è diversa nei due emisferi.

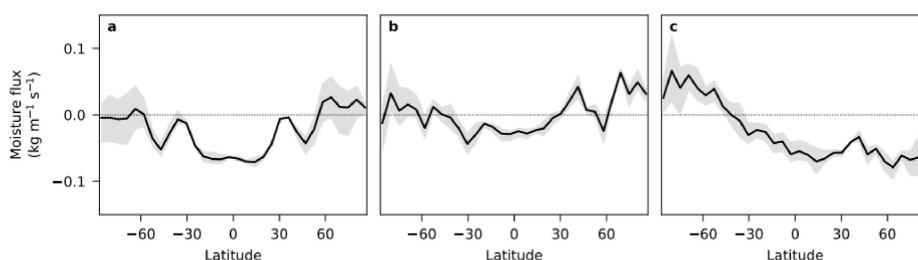


Figura 2.11: Differenze di flusso di umidità.

Nella Fig. 2.11 sono mostrate le differenze medie temporali e zonali nel flusso di umidità atmosferica meridionale tra i perielio invertito e simulazioni moderne (a) senza topografia, (b) con topografia, e (c) con topografia e maggiore conduttività idraulica. In tutti i casi, l'ombreggiatura grigia mostra l'intervallo di medie decennali negli ultimi tre decenni di simulazioni. I valori positivi indicano il trasporto verso nord.

Infine, le risposte di precipitazione ed evaporazione al perielio invertito sono mostrate in Fig. 2.12. In tutti i casi, il perielio invertito porta ad un aumento (diminuzione) delle precipitazioni nelle regioni

meridionali (nord) (Fig. 2.12 a), con sottili differenze di latitudine che implicano una debole dipendenza dalla topografia oltre altri fattori, come i liquidi superficiali, ma diversa conducibilità idraulica producono risultati leggermente diversi. Il segnale di forzatura orbitale è meno chiaro ai poli. In particolare, i tassi di precipitazione sopra il polo sud sono inferiori nelle simulazioni del perielio invertito in tutti i casi, anche se con notevole variabilità.

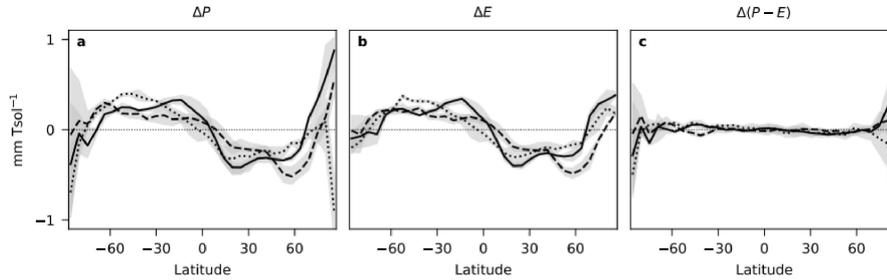


Figura 2.12: Risposte dei flussi superficiali alla forzatura orbitale.

Nella Fig. 2.12 sono mostrate le differenze temporali e medie zonali in (a) precipitazioni, (b) evaporazione, e (c) precipitazione meno evaporazione tra perielio invertito e simulazioni moderne. I risultati sono mostrati per simulazioni senza topografia (curve continue), simulazioni con topografia (curve tratteggiate) e simulazioni con topografia e maggiore conducibilità idraulica (curve a punti). In tutti i casi, l'ombreggiatura grigia mostra l'intervallo di medie decennali negli ultimi tre decenni delle simulazioni.

In termini di massa di metano, le differenze di precipitazione sono più grandi alle latitudini più basse, con picchi di  $10^{14}$   $\text{kgyr}^{-1}$  intorno a  $15\text{--}45^\circ$  in entrambi gli emisferi; questi sono ordini di magnitudo inferiore alle precipitazioni totali annue.

Come per le risposte alla topografia, le risposte di evaporazione alla forzatura orbitale sono molto simili per le precipitazioni, tranne che ai poli dove l'evaporazione del metano dal sottosuolo è importante (Fig. 2.12 b). Il risultato è che la risposta della precipitazione netta (P-E) ai cambiamenti orbitali è quasi zero ovunque, con risposte rumorose ai poli (Fig. 2.12 c). Solo il caso con topografia e conducibilità idraulica più elevata suggerisce precipitazioni nette inferiori al polo settentrionale. I liquidi superficiali nelle nostre simulazioni non mostrano una risposta consistente alla forzatura orbitale.

Ciò indica ulteriormente l'importanza dell'interazione e dei feedback tra i meccanismi che portano alla distribuzione dei liquidi e alle loro risposte alle asimmetrie stagionali. Non c'è una semplice precipitazione o risposta all'evaporazione nel nostro modello accoppiato che può spiegare chiaramente l'asimmetria osservata dei liquidi superficiali di Titano. Concludiamo che tale asimmetria probabilmente non è una semplice espressione di forzatura orbitale, nonostante la chiara risposta atmosferica ai cambiamenti nelle asimmetrie stagionali.

# 3

## Capitolo 3

In questo capitolo approfondiremo i processi lacustri/marini, fluviali e pluviali studiati tramite la missione Huygens-Cassini e le principali evidenze scientifiche derivanti da questa, l'influenza solare sull'atmosfera di Titano ed infine le prerogative per una vita su di esso.

### 3.1 EVIDENZE DERIVANTI DALLA MISSIONE CASSINI-HUYGENS

Durante l'ultimo incontro ravvicinato con Titano (22 aprile 2017), la sonda Cassini ha utilizzato il suo RADAR come ecoscandaglio per sondare la profondità di diversi laghi nel terreno polare settentrionale. Questa è stata la prima volta che i laghi di Titano, al contrario dei suoi mari, sono stati visti in una configurazione sonora.

Durante i 13 anni (2004-2017) dello studio del sistema saturniano, lo strumento RADAR multimodale a bordo della sonda Cassini ha mappato centinaia di laghi e tre grandi mari situati nell'emisfero settentrionale della più grande luna di Saturno, Titano (Fig. 3.1). La presenza di questi bacini è stata identificata come una forte prova di un ciclo idrologico a base di metano che si svolge sulla superficie e nell'atmosfera di Titano.

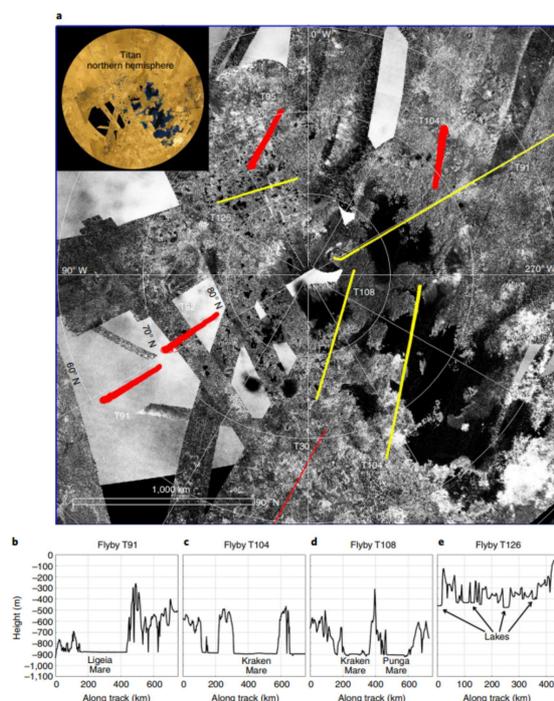


Figura 3.1: Mosaico di immagini RADAR Cassini e tracce altimetriche acquisite durante la missione Cassini nella regione polare settentrionale di Titano. Nella figura *a* vi è il mosaico SAR e le relative tracce altimetriche (linee rosse e gialle) acquisite del terreno polare settentrionale. In giallo sono rappresentate le tracce al suolo dei profili altimetrici riportati in *b-e*, i quali sono ottenuti rispettivamente dai sorvoli T91, T104, T108 e T126. Il livello del liquido dei laghi (flyby T126) è di circa 400 m sopra il livello del mare (flyby T91, T104, T108).

Distribuiti su un'area di  $7 \times 10^5 \text{ km}^2$ , a nord di Titano i laghi polari mostrano una luminosità variabile nelle immagini radar e sono caratterizzati da bacini/depressioni circolari allungati, spesso racchiusi da bordi rialzati. I canali di afflusso e deflusso non sono visibili alla risoluzione dell'immagine SAR (circa 300 m). A meno che le depressioni non siano collegate da canali irrisolti (e quindi stretti) ma comunque estesi, ciò implica che l'asportazione di materiale avvenga mediante processi come la sublimazione o la dissoluzione seguiti dal trasporto nel sottosuolo. Il riferimento ha interpretato la topografia dei laghi di Titano come l'effetto dei processi di dissoluzione carsica che agisce sulla superficie, sebbene la natura dei loro bordi rialzati rimanga sconosciuta.

Osservazioni specifiche effettuate dallo strumento Cassini RADAR in modalità altimetrica hanno permesso di determinare la profondità e la composizione di alcuni dei corpi liquidi più grandi, come Ligeia Mare, Punga Mare e Ontario Lacus. Questi laghi possono superare i 100 m di profondità e la loro trasparenza alla lunghezza d'onda radar di 2,17 cm indica che hanno una composizione dominata dal metano. Questa composizione differisce in modo significativo da quella dell'Ontario Lacus, l'unico grande lago nell'emisfero meridionale di Titano, che è più ricco di etano.

L'ultimo passaggio ravvicinato di Titano (T126) da parte di Cassini è avvenuto il 22 aprile 2017 e ha avuto una traccia del suolo che ha attraversato diversi laghi di diametro variabile da 10 a 50 km (Fig. 3.2). Il flyby del T126 ha permesso al RADAR di osservare questi laghi in modalità altimetrica, acquisendo 211 burst di dati al nadir (angoli di incidenza minori di 0.08 gradi) lungo 450 km di pista a terra da un'altitudine compresa tra 1.080 e 1.280 km.

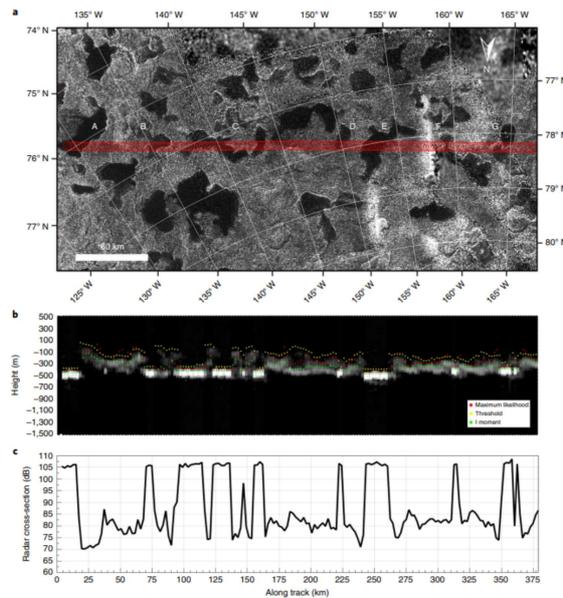


Figura 3.2: Laghi intercettati dall'altimetria radar durante il sorvolo del T126. *a* Mosaico di immagini radar con traccia altimetrica relativa in uscita sovradimensionata del flyby T126 con cerchi rossi che indicano impronte a -3 dB di guadagno dell'antenna e le lettere A-G segnano le posizioni dei laghi intercettati dalla pista di terra. *b* Radargramma e profili altimetrici relativi alla sfera di 2.575 km di Titano ottenuti con diversi metodi di tracciamento. L'ombreggiatura bianca e grigia del radargramma indica differenze nella sezione trasversale del radar. *c* Sezione radar del flyby del T126. Le brusche variazioni dei valori della sezione trasversale indicano la presenza di liquido intercettato dal radar.

Il profilo altimetrico ottenuto mediante l'elaborazione convenzionale e la relativa sezione radar sono mostrati rispettivamente nelle Fig. 3.2 b,c. I bruschi cambiamenti nella sezione trasversale del radar sono indicativi dell'improvvisa transizione tra superfici liquide e solide. L'analisi dei dati altimetrici insieme alle immagini SAR suggerisce l'intercettazione di sette laghi (di seguito indicati con lettere da A a G) circondati da un terreno caratterizzato da variabilità topografica alla scala di 100 m (Fig. 3.2 b).

Subito dopo la transizione tra modalità SAR e modalità altimetrica, l'impronta ha intercettato il primo lago: Oneida Lacus (lago A), situato a  $76^\circ$  N,  $135^\circ$  W. Oneida Lacus è stato osservato solo parzialmente lungo 15 km di tracciato ma sembra essere il più scuro nelle immagini SAR, probabilmente a causa delle sue profondità estreme. Successivamente sono state osservate altre caratteristiche lacustri. A poche decine di chilometri da Oneida sono stati osservati un lago luminoso (lago B) e un lago a forma di 'S' (lago C) a circa  $76,5^\circ$  N,  $135^\circ$  O e  $77^\circ$  N,  $140^\circ$  O, rispettivamente, seguito da un laghetto (lago D) dove sono stati acquisiti solo due echi sul liquido. Successivamente è stato osservato per circa 20 km di tracciato un lago a forma di 'cavalluccio marino' (lago E o Winnipeg Lacus) situato all'incirca a  $78^\circ$ N,  $155^\circ$ W ed infine sono stati acquisiti dati per i laghi F e G situati a  $78,5^\circ$ N,  $160^\circ$  O e  $78,5^\circ$  N,  $165^\circ$  O, rispettivamente, sopra i quali l'impronta dell'antenna illuminava una regione in cui erano presenti sia la superficie liquida che quella solida.

Soffermiamoci sul risultato dell'elaborazione altimetrica applicata ai laghi A e C (Fig. 3.3). I radargrammi ottenuti dal lago a forma di S (lago C) sono mostrati in Fig. 3.3 e,f. Sebbene abbiamo applicato tecniche di super-risoluzione a questo set di dati, gli echi ricevuti dal fondo del lago sono difficili da separare dagli echi speculari generati in superficie. La Fig. 3.3 h,i mostra esempi di forme d'onda acquisite a circa  $140,17^\circ$  e  $142,64^\circ$  di longitudine sopra il lago C. Queste forme d'onda indicano che la parte più profonda misurata lungo la traccia è di circa 30-40 m, il che è coerente con l'aumento della luminosità registrato dalle immagini SAR, che indica un bacino poco profondo.

In generale, abbiamo scoperto che il backscatter SAR è correlato alle misurazioni della profondità derivate dal sondaggio. In altre parole, i laghi più scuri appaiono più scuri perché sono più profondi e non perché hanno composizioni significativamente diverse dai laghi più luminosi osservati.

Inoltre, la Fig. 3.3 mostra l'immagine SAR di Oneida Lacus (lago A; Fig. 3.3a), il relativo radargramma (Fig. 3.3 d) e una forma d'onda (Fig. 3.3 g). Le forme d'onda non mostrano prove inequivocabili di un fondale continuo, sebbene alcuni echi ricevuti appena al di sopra del livello di rumore indichino che la profondità del fondale è superiore a 150 m, il che è coerente con l'oscurità del lago come appare nelle immagini SAR.

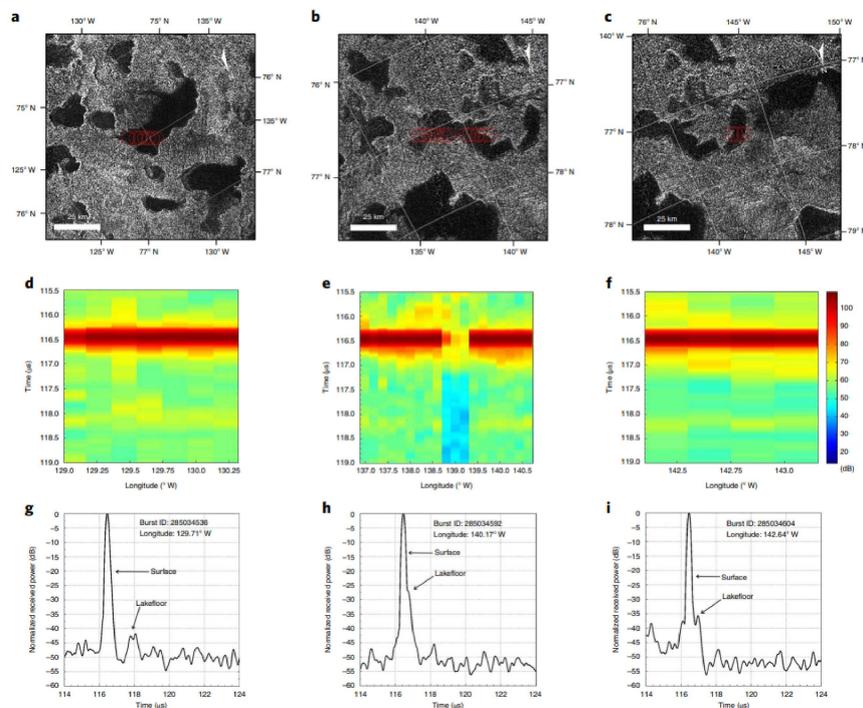


Figura 3.3: Rilevamenti ambigui si verificano quando le forme d'onda non mostrano chiari ritorni nel sottosuolo a causa del basso rapporto segnale-rumore (SNR) o della risoluzione radar.

Lungo i 450 km di osservazione che si estendono su questa regione, il radaraltimetro non ha rilevato alcuna riflessione speculare aggiuntiva da corpi liquidi più piccoli come i canali o piccoli laghi/stagni di dimensioni simili all'area di Fresnel (circa  $4 \times 10^4 \text{ m}^2$ ), essendo l'altimetro molto sensibile all'eventuale presenza di superfici liquide di estensione paragonabile al diametro di Fresnel (da circa 200m a 1.000 km di altitudine). Sebbene ciò non escluda la possibile presenza di piccoli fiumi vicino ai laghi, suggerisce che il trasporto dei liquidi potrebbe avvenire tramite flusso sotterraneo o afflusso e deflusso superficiale.

Oltre all'analisi della profondità/composizione di ogni singolo lago, abbiamo studiato il backscattering superficiale di tutti i laghi osservati. è stato riscontrato che tutti i laghi (distribuiti lungo più di 350 km di tracciato) hanno un backscattering molto simile rispetto Ligeia Mare (Fig. 3.4).

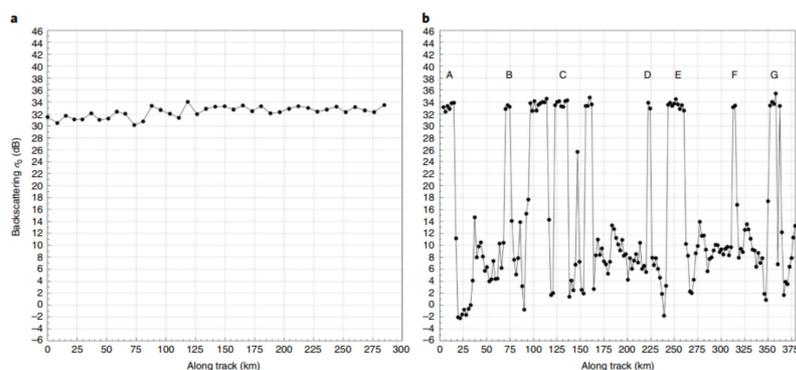


Figura 3.4: a,b, Confronto tra il backscattering superficiale ottenuto dal Ligeia Mare (a) e i laghi A-G osservati durante il flyby T126 (b). La somiglianza e la stabilità delle misurazioni di Ligeia e dei laghi lungo centinaia di chilometri di tracce è indicativa di una simile composizione dominata dal metano e nessuna variazione significativa della rugosità al momento dell'osservazione.

La Fig. 3.5 mostra un esempio di due forme d'onda radar acquisite quando il fondale marino si trovava a una profondità di circa 75 e 90 metri, sopra Winnipeg Lacus e North Ligeia Mare. Sia la forma radar che le ampiezze sono simili, indicando che oltre alla composizione liquida e alla rugosità, i pavimenti di questi bacini sono simili e composti, molto probabilmente, da materiale organico compattato risultante da un processo di deposizione.

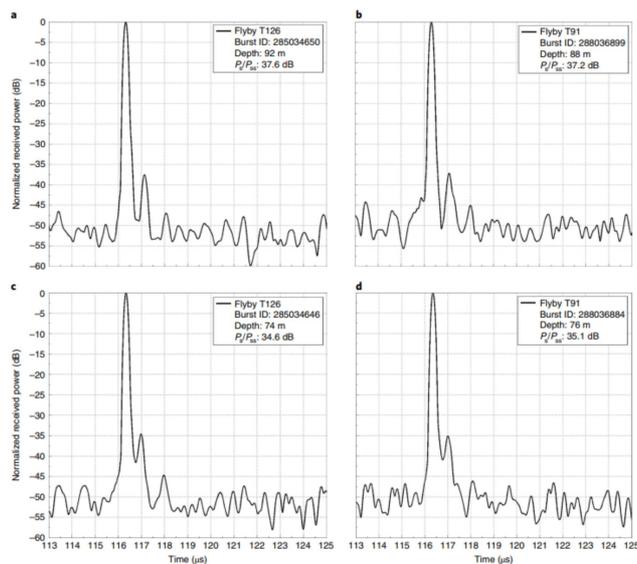


Figura 3.5: Forme d'onda di Ligeia Mare e Winnipeg Lacus acquisite a profondità simili. a,b Forme d'onda acquisite a circa 90 m di profondità. c,d Forme d'onda acquisite a circa 75 m di profondità.

I dati raccolti mostrano anche laghi profondi circa 100 m sopraelevati centinaia di metri sopra il livello

del mare. Mentre i piccoli laghi isolati possono essere alimentati dai volatili atmosferici e dal flusso sotterraneo, i mari più grandi con le reti di canali associate richiedono il deflusso superficiale e offrono quindi analoghi ai sistemi di drenaggio terrestri.

La scala temporale limite per la situazione attuale potrebbe essere rappresentata dai cicli Croll-Milankovich di  $10^5$  anni guidati dalla precessione assidale di Saturno, che possono causare l'essiccazione periodica di ciascun polo. L'origine delle precipitazioni regionali nell'area dei laghi è recente se confrontata con il ciclo di insolazione di  $10^5$  anni ed è coerente con la composizione ricca di metano che abbiamo osservato.

Questi aumenti del livello del liquido possono essere confrontati con la recessione dei laghi osservata nel sud. Ontario Lacus è stato visto cambiare nel corso di diversi anni di osservazioni a una velocità di diverse decine di cm/anno. Complessivamente, i cambiamenti osservati corrispondono ad una recessione del lago paragonabile per magnitudo altimetrica ed estensione areale agli incrementi dedotti qui al Nord.

Il RADAR Cassini operante in modalità SAR ha ripreso le reti fluviali con affluenti che si fondono e drenano laghi e mari. I dati rivelano i dettagli delle valli incise nel terreno, la morfologia della costa e le variazioni di contrasto nelle aree scure e coperte di liquido. Inoltre l'unico grande lago misurato nel sud, Ontario Lacus, sembra essere il residuo di un lago molto più grande essendo circondato da depositi di evaporite.

Dunque, è stato proposto un processo di formazione carsica per le depressioni lacustri. Mentre il ghiaccio d'acqua non può essere dissolto in misura significativa dal metano liquido e/o dall'etano, le sostanze organiche solide possono, e gran parte della superficie osservabile di Titano sembra essere ricca di sostanze organiche. In particolare, il benzene e l'acetilene sono solubili nell'etano liquido a 94K a valori paragonabili alla dissoluzione di minerali a base di calcio nell'acqua del mare terrestre.

## 3.2 INFLUENZA SOLARE SULL'ATMOSFERA DI TITANO

Tra gli obiettivi della missione Cassini-Huygens vi è anche quello di cercare prove del degassamento in corso che potrebbe suggerire riserve di metano nel sottosuolo. Se non esistesse un tale serbatoio, Titano come lo osserviamo potrebbe fornire un'interessante analogia per il nostro mondo natale tra uno o due miliardi di anni, quando la luminosità del Sole aumenterà sufficientemente per riscaldare la troposfera fino al punto in cui l'acqua sfugge alla nostra stratosfera (Caldeira Kasting 1992) a un tasso paragonabile a quello del metano presente su Titano.

La luce ultravioletta del Sole provoca una rapida fuga del metano verso la stratosfera, attraverso una rottura della molecola di metano e quindi una perdita irreversibile di idrogeno. Lo stesso accade all'acqua nella stratosfera terrestre, ma a un ritmo molto più lento. Tutto il metano nell'atmosfera di Titano andrà perso in un lasso di tempo di 100 milioni di anni o meno partendo da ora.

La distruzione del metano da parte della luce ultravioletta lasciata dal Sole ha un'altra profonda conseguenza per il ciclo del metano su Titano. I frammenti attivi, come CH,  $CH_2$  e  $CH_3$ , si ricombinano per produrre idrocarburi con rapporti C/H superiori a 1/4 e nitrili. Tra i prodotti più abbondanti vi sono l'etano ( $C_2H_6$ ), l'acetilene ( $C_2H_2$ ) e l'acido cianidrico (HCN). L'etano insieme al propano ( $C_3H_8$ ) sono liquidi alla temperatura superficiale equatoriale di Titano; tutti gli altri prodotti della fotochimica stratosferica di Titano sono solidi.

Tuttavia, molti di questi si dissolvono in misura significativa nel liquido. Le pressioni di vapore di metano, etano e propano variano su sei ordini di grandezza a una data temperatura del lago, eppure i dati termodinamici indicano che sono completamente miscibili (Cordier et al. 2010). Pertanto, abbiamo la situazione unica che il metano, e in sua assenza l'etano, migrerà dal polo estivo a quello

invernale per evaporazione e condensazione mentre il Sole si sposta per un anno di Titano (30 anni terrestri), mentre le altre sostanze organiche rimarranno stabili. L'etano mescolato al metano in un lago o in un mare è immobile perché l'evaporazione del metano domina e utilizza essenzialmente tutto il flusso solare disponibile.

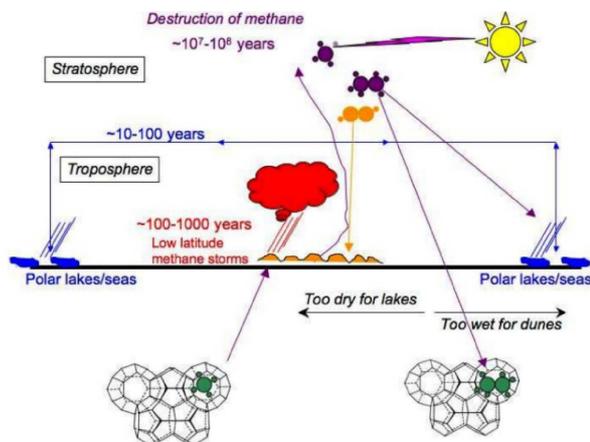


Figura 3.6: Sono rappresentati elementi del ciclo del metano di Titano noti ritenuti presenti, insieme a scale temporali per la distruzione del metano ( $10^7 - 10^8$  anni), umidificazione ciclica delle basse latitudini (100 - 1000 anni) e il ciclo stagionale del metano tra i poli (10 - 100 anni) (Lunine Atreya 2008).

La fase dell'inclinazione stagionale di Titano rispetto al perielio dell'orbita di Saturno si sposta su scale temporali di decine di migliaia di anni. Su queste scale temporali i costituenti meno volatili - etano e propano - possono spostarsi da un polo all'altro, insieme all'acetilene solido.

Nel corso di un ciclo annuale laghi e mari si alterneranno tra composizioni più ricche di metano e quelle più ricche di etano e propano. Questo, a sua volta, ha conseguenze sorprendenti sull'aspetto dei laghi e dei mari, perché la viscosità di un lago di etano-propano è sette volte maggiore di quella di un lago di metano puro alla stessa temperatura (Lorenz et al. 2010).

Anche se i laghi e i mari di Titano hanno destato vivo interesse in virtù del fatto di essere stati i primi elementi liquidi ad essere definitivamente individuati su un altro corpo, la più grande riserva di materiale organico sulla superficie di Titano è solida e per lo più confinata in una fascia equatoriale di dune che occupano circa il 20% dell'intero globo. La misurazione della costante dielettrica delle dune a 2 cm di lunghezza d'onda (Lorenz et al. 2006) e la mappatura dei colori nel vicino infrarosso (Barnes et al. 2008) sono entrambe coerenti con il fatto che le particelle delle dune sono costituite in gran parte da sostanze organiche solide.

### 3.2.1 L'ETANO E IL PROPANO SOSTITUIRANNO IL CICLO DEL METANO SU TITANO?

Nel paragrafo precedente è stato illustrato come la distruzione del metano da parte della luce ultravioletta proveniente dal Sole conduca alla produzione di idrocarburi. L'etano e il propano sono tra i più abbondanti, in aggiunta sono liquidi alla temperatura superficiale equatoriale di Titano. Interessante è lo studio di queste due sostanze al fine di comprendere se possono andare a sostituire il metano nel ciclo idrologico su Titano.

Per verificare ciò andiamo a studiare cosa accade prima all'etano e successivamente al propano se sottoposti alle temperature e alla pressione che vi sono su Titano. Come già affermato sappiamo che questi due composti sono liquidi alla temperatura (in media 94 K) e alla pressione superficiale di Titano (in media 1,6 bar).

Partiamo trasformando la pressione media di Titano 1,6 bar in 1.6 atm (1 atm equivale a circa 1,01 bar), essendo la pressione atmosferica normale sulla Terra 1 atm, approssimiamo la pressione atmo-

sferica di Titano a quella terrestre, al fine di studiare il punto di fusione ed evaporazione dell'etano e del propano, allo scopo di vedere se nel range delle temperature dell'atmosfera di Titano è possibile il passaggio di stato rispettivamente dallo stato solido a liquido, da liquido a vapore. Il passaggio di stato solido-vapore (e viceversa) non è possibile sia per l'etano che per il propano a causa della pressione richiesta troppo bassa.

L'etano è allo stato liquido alla pressione di 1,6 bar e alla temperatura di 94 K. Sulla Terra il punto di fusione e di evaporazione si hanno rispettivamente alla temperatura di 90,3 K e 184,5 K. Sapendo che la temperatura su Titano oscilla tra circa gli 80 e i 180 K, si può concludere affermando che è possibile il passaggio di stato solido-liquido (e viceversa), mentre per il passaggio liquido-vapore (e viceversa) siamo nel caso limite di temperatura consentito per quanto riguarda l'etano.

Per quanto concerne il propano invece la temperatura di fusione e di evaporazione sono rispettivamente 85,6 K e 231,1 K, dunque tenendo in considerazione il range di temperature massime e minime su Titano il passaggio di stato solido-liquido (e viceversa) è possibile, mentre il passaggio liquido-vapore (e viceversa) non è possibile in quanto su Titano non si verificano delle temperature così alte.

In conclusione, il ciclo del metano su Titano in futuro potrebbe essere sostituito parzialmente dall'etano, ma non dal propano.

### 3.3 FORME DI VITA SU TITANO

La produzione nella stratosfera e la presenza di acetilene sulla superficie di Titano forniscono il potenziale per una fonte di calore utilizzabile per le reazioni chimiche. I legami di carbonio di insaturazione dell'acetilene consentono la possibilità di reazioni chimiche esotermiche che producono benzene ( $C_6H_6$ ) da tre molecole di acetilene o vari tipi di poliacetileni a seconda della presenza di impurezze o dell'applicazione della pressione (Ceppatelli et al. 2000).

Il calore disponibile dalla reazione di "ciclizzazione" per formare benzene è di circa 334 kJoule per mole di acetilene (McKay & Smith 2005), ma deve essere superata una barriera energetica di attivazione di circa 140 kJoule/mole. I raggi cosmici sembrano essere la fonte di energia più prevedibile per superare la barriera, eccitando l'acetilene allo stato di tripletto (Zhou et al. 2010). L'energia chimica rilasciata sotto forma di calore durante la ciclizzazione dell'acetilene a benzene sarebbe sufficiente, sulla Terra, a sostenere un metabolismo metanogenico su base (McKay & Smith 2005). Tuttavia, l'acqua liquida necessaria per tutte le forme di vita terrestre non è termodinamicamente stabile sulla superficie di Titano; la sua presenza sarebbe transitoria e limitata alle zone del sottosuolo associate con impatti e fusione del ghiaccio d'acqua "bedrock" in un processo chiamato "cryovolcanism" per analogia con il vulcanismo di silicato terrestre (O'Brien et al. 2005).

Più speculativa ma anche più intrigante è la possibilità che una forma di vita possa esistere nel metano e nell'etano liquidi, sebbene così primitiva da poter essere considerata un precursore della vita o una transizione tra chimica vivente e non vivente (Benner, et al. 2004). Se un simile sistema chimico dovesse esistere nei laghi e nei mari di Titano, potrebbe essere sostenuto energeticamente dalla luce ultravioletta proveniente dal Sole immagazzinata nei legami chimici insaturi dell'acetilene prodotto in alto nella stratosfera di Titano.

Naturalmente, una forma di vita basata sul metano non avrebbe alcuna somiglianza biochimica con la vita sulla Terra, nemmeno nelle unità fondamentali dei biopolimeri come gli amminoacidi e le basi degli acidi nucleici. Tale vita è una possibilità molto remota, ma se si scoprisse l'esistenza, rafforzerebbe l'idea che la vita può formarsi ovunque siano presenti i requisiti generali di energia libera termodinamica, molecole organiche e fasi liquide.

# 4

## Capitolo 4

### 4.1 CONCLUSIONE

In sintesi, alla luce degli argomenti discussi si possono riassumere i risultati raccolti affermando che su Titano c'è una circolazione su larga scala, ed è quest'ultima a guidare il ciclo del metano. Nello specifico, c'è una circolazione di Hadley su larga scala guidata dal gradiente di insolazione polo-equatore, e partendo da questo modello di circolazione si possono sottolineare allo stesso tempo le analogie e le differenze con il modello di circolazione sulla Terra.

Su di essa avviene un trasporto netto fisicamente simile alla circolazione di Hadley su Titano, ma la differenza risiede nell'estensione limitata del trasporto sulla Terra. Su quest'ultima il trasporto si estende dall'equatore ai tropici in modo speculare rispetto all'equatore, mentre su Titano si estende dall'equatore ai poli anche in questo caso in modo simmetrico rispetto all'equatore.

Concludiamo rispondendo alle domande poste nell'introduzione:

- Quali sono le condizioni fisiche necessarie affinché si verifichi un ciclo idrologico dell'acqua sulla Terra e del metano su Titano?

In generale, esiste un ciclo idrologico in un'atmosfera planetaria se quell'atmosfera contiene un condensabile; cioè un gas che è suscettibile ai cambiamenti di fase a temperature tipiche all'interno dell'atmosfera, dalla fase gassosa a quella solida o liquida. Il ciclo idrologico sarà quindi importante in funzione sia della quantità di condensabile che del suo calore latente.

- Quali sono le condizioni fisiche necessarie per mantenere attivo un ciclo idrologico sulla Terra e su Titano?

Il ciclo idrologico viene mantenuto attivo su Titano e sulla Terra grazie allo squilibrio radiativo che comporta un trasporto netto del liquido condensabile.

- Quali sono le cause dell'asimmetria emisferica dei laghi e dei mari su Titano?

Con il modello accoppiato della circolazione su Titano e del ciclo del metano, abbiamo studiato l'influenza della topografia e della forzante orbitale sull'idroclima con una serie di simulazioni. I risultati mostrano che la topografia influisce sulla distribuzione delle precipitazioni, migliorando in particolare le precipitazioni alle medie latitudini, ma incide debolmente sui contrasti emisferici nord-sud e che la forzatura orbitale produce una risposta robusta nel trasporto netto di umidità atmosferica meridionale.

Questo trasporto è sensibile anche ad altri fattori, ad ogni modo i risultati suggeriscono che se il polo sud ha una conduttività idraulica inferiore rispetto a quella del polo nord, da solo potrebbe potenzialmente spiegare l'asimmetria osservata, nonostante siano molti meccanismi potrebbero contribuire.

- Quali sono le evidenze derivanti dalla missione Cassini-Huygens?

Le principali evidenze derivanti dalla missione Cassini-Huygens consistono nell'analisi della com-

posizione e della profondità dei laghi e dei mari di Titano, è emerso che possono superare i 100 m di profondità e hanno una trasparenza alla lunghezza d'onda radar di 2,17 cm, ciò indica che hanno una composizione dominata dal metano. Questa composizione differisce in modo significativo da quella dell'Ontario Lacus, l'unico grande lago nell'emisfero meridionale di Titano, che è più ricco di etano.

Inoltre il radaraltimetro non ha rilevato alcuna riflessione speculare aggiuntiva da corpi liquidi più piccoli come i canali o piccoli laghi/stagni, ciò suggerisce che il trasporto dei liquidi potrebbe avvenire tramite flusso sotterraneo o afflusso e deflusso superficiale.

- Cosa comporta l'influenza solare sull'atmosfera di Titano?

La luce ultravioletta del Sole provoca una rapida fuga del metano verso la stratosfera, attraverso una rottura della molecola di metano e quindi una perdita irreversibile di idrogeno.

- Esistono delle prerogative per avere una forma di vita su Titano?

La distruzione del metano da parte della luce ultravioletta lasciata dal Sole e la conseguente produzione di frammenti attivi, come  $CH$ ,  $CH_2$  e  $CH_3$  che si ricombinano per produrre idrocarburi gettano le basi per una possibile vita su Titano tramite reazioni esotermiche che conducono alla produzione di benzene.

Vi è anche la remota possibilità che una forma di vita possa esistere nel metano liquido, e se si scoprisse l'esistenza di tale vita si rafforzerebbe l'idea che possa formarsi ovunque siano presenti i requisiti generali di energia libera termodinamica, molecole organiche e fasi liquide.

La tesi si conclude con un finale aperto che riguarda il degassamento del metano per opera dell'influenza solare su Titano con la possibilità di sostituzione con un ciclo dell'etano o del propano e la possibilità di forme di vita su Titano, sulla quale sono state avanzate ipotesi, ma solamente tramite la continua ricerca e lo studio dei dati derivanti dalle missioni si potrà arrivare ad una risposta concreta.

## 4.2 BIBLIOGRAFIA

- Aharonson, O., A. Hayes, J. Lunine, R. Lorenz, M. Allison, and C. Elachi, 2009: An asymmetric distribution of lakes on Titan as a possible consequence of orbital forcing. *Nat. Geo.*, 2 (12), 851–854;
- Barnes, J. W., et al. 2008, *Icarus*, 195, 400;
- Barth, E. L., and O. B. Toon, 2006: Methane, ethane, and mixed clouds in Titan’s atmosphere: Properties derived from microphysical modeling. *Icarus*, 182 (1), 230–250;
- Benner, S. A., Alonso, R. et Carrigan, M. A. 2004, *Curr. Opin. Chem. Bio.*, 8, 672;
- Brown, M. E., A. H. Bouchez, and C. A. Griffith, 2002: Direct detection of variable tropospheric clouds near Titan’s south pole. *Nature*, 420 (6917), 795–797;
- Caldeira, K. et Kasting, J. F. 1992, *Nature*, 360, 721;
- Ceppatelli, M. et al. 2000, *J. Chem. Phys.*, 113, 5991;
- Cordier, D. et al. Structure of Titan’s evaporites. *Icarus* 270, 41–56 (2016);
- Cordier, D. et al. 2010, *ApJ*, 707, L128;
- Coustenis, A, Taylor, F. 2008 *Titan: Exploring an Earthlike World*, World Scientific, 393pp;
- Dhingra, R. D. et al. Observational evidence for summer rainfall at Titan’s north pole. *Geophys. Res. Lett.* 46, 1205–1212 (2019);
- Faulk, S. P., J. M. Lora, J. L. Mitchell, and P. Milly, 2019: Titan’s climate patterns and surface methane distribution due to the coupling of land hydrology and atmosphere. *Nat. Astron.*, 1–9;
- Faulk, S.P., Lora, J.M., Mitchell, J.L., Milly, P.C.D., 2020. Titan’s climate patterns and surface methane distribution due to the coupling of land hydrology and atmosphere. *Nature Astronomy* 4, 390–398;
- Geoffrey K Vallis. *The Trouble with Water: Condensation, Circulation and Climate.* (2020)
- Glein, C. R. Shock, E. L. A geochemical model of non-ideal solutions in the methane–ethane–propane–nitrogen system on Titan. *Geochim. Cosmochim. Acta* 115, 217–240 (2013):
- Griffith, C. A., J. L. Hall, and T. R. Geballe, 2000: Detection of daily clouds on Titan. *Science*, 290 (5491), 509–513;
- Halevy, I., M. T. Zuber, and D. P. Schrag, 2007: A sulfur dioxide climate feedback on early Mars. *Science*, 318 (5858), 1903–1907;
- Hayes A.G. et al. Hydrocarbon lakes on titan: Distribution and interaction with a porous regolith. *Geophys. Res. Lett.*, 2008;
- Hayes A.G. et al. Transient surface liquid in titans polar regions from cassini. *Icarus*, 2011;
- Lora, J.M., Lunine, J.I., Russell, J.L., 2015. GCM simulations of Titan’s middle and lower atmosphere and comparison to observations. *Icarus* 250, 516–528;
- Lora, J.M., Lunine, J.I., Russell, J.L., Hayes, A.G., 2014. Simulations of Titan’s paleoclimate. *Icarus* 243, 264–273;
- Lora, J. Michael Battalio, Mary Yapa and Colin Baciocco. Topographic and orbital forcing of Titan’s hydroclimate;
- Lorenz, R. D. Lunine, J. I. Erosion on Titan: past and present. *Icarus* 122, 79–91 (1996);
- Lorenz, R. D. et Lunine, J. I. 2002, *Icarus*, 158;

- Lorenz, R. D. et al. 2006, *Science*, 312, 724;
- Lorenz, R. D., Newman, C. et Lunine, J. I. 2010, *Icarus*, 207, 932
- Lorenz, R.D., Stiles, B.W., Aharonson, O., Lucas, A., Hayes, A.G., Kirk, R.L., Zebker, H.A., Turtle, E.P., Neish, C.D., Stofan, E.R., Barnes, J.W., the Cassini RADAR team, 2013. A global topographic map of Titan. *Icarus* 225, 367–377;
- Lunine, J. I. et Lorenz, R. L. 2009, *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 37, 299;
- Lunine J. I., The hydrologic cycle on Saturn’s moon, Titan;
- MacKenzie, S. M. Barnes, J. W. Compositional similarities and distinctions between Titan’s evaporitic terrains. *Astrophys. J.* 821, 17 (2016);
- Malaska, M. J. Hodyss, R. Dissolution of benzene, naphthalene, and biphenyl in a simulated Titan lake. *Icarus* 242, 74–81 (2014);
- Mastrogiuseppe, M. et al. Te bathymetry of a Titan sea. *Geophys. Res. Lett.* 41, 1432–1437 (2014);
- M. Mastrogiuseppe, V. Poggiali, A. G. Hayes, J. I. Lunine, R. Seu, G. Mitri and R. D. Lorenz. Deep and methane-rich lakes on Titan. *Natur astronomy*.
- Mastrogiuseppe, M. et al. Cassini radar observation of Punga Mare and environs: bathymetry and composition. *Earth Planet. Sci. Lett.* 496, 89–95 (2018);
- McKay, C. P., J. B. Pollack, and R. Courtin, 1991: The greenhouse and antigreenhouse effects on Titan. *Science*, 253 (5024), 1118–1121;
- McKay, C. P. Smith, H. D. 2005, *Icarus*, 178, 274;
- Mitchell, J. L., and J. M. Lora, 2016: The climate of Titan. *Ann. Rev. Earth Plan. Sci.*, 44, 353–380;
- Mitchell, J. L., 2012: Titan’s transport-driven methane cycle. *Astrophys. J.*, 756 (2), L26;
- O’Brien, D. P. Lorenz, R. D., et Lunine, J. I. 2005, *Icarus*, 173, 243;
- Rannou, P., F. Montmessin, F. Hourdin, and S. Lebonnois, 2006: The latitudinal distribution of clouds on Titan. *Science*, 311, 201–205;
- Jacob T. Seeley and Robin D. Wordsworth, Moist convection is most vigorous at intermediate atmospheric humidity (2023);
- Read, P., 2011: Dynamics and circulation regimes of terrestrial planets. *Plan. and Space Sci.*, 59 (10), 900–914;
- Rodriguez, S., and Coauthors, 2009: Global circulation as the main source of cloud activity on Titan. *Nature*, 459 (7247), 678;
- Roe, H. G., 2012: Titan’s methane weather. *Ann. Rev. Earth Plan. Sci.*, 40, 355–382;
- Roe, H.G., Brown, M.E., Schaller, E.L., Bouchez, A.H., Trujillo, C.A., 2005. Geographic control of Titan’s mid-latitude clouds. *Science* 310, 477–479;
- Schaller, E., H. Roe, T. Schneider, and M. Brown, 2009: Storms in the tropics of Titan. *Nature*, 460 (7257), 873–875;
- Schneider, T., S. Graves, E. Schaller, and M. Brown, 2012: Polar methane accumulation and rainstorms on Titan from simulations of the methane cycle. *Nature*, 481 (7379), 58;
- Stofan, E. R., and Coauthors, 2007: The lakes of Titan. *Nature*, 445 (7123), 61–64;
- Stofan E.R. et al. The lakes of titan. *Nature*, 2008;

- Tokano, T., C. P. McKay, F. M. Neubauer, S. K. Atreya, F. Ferri, M. Fulchignoni, and H. B. Niemann, 2006: Methane drizzle on Titan. *Nature*, 442 (7101), 432;
- Tokano, T., 2019. Orbitally and geographically caused seasonal asymmetry in Titan's tropospheric climate and its implications for the lake distribution. *Icarus* 317, 337–353
- Turtle, E., and Coauthors, 2018: Titan's meteorology over the Cassini mission: Evidence for extensive subsurface methane reservoirs. *Geophys. Res. Lett.*, 45 (11), 5320–5328;
- Turtle E.P. et al. Rapid and extensive surface changes near titans equator: Evidence of april showers. *Science*, 2011;
- Turtle, J. E. Perry, A. G. Hayes, and A. S. McEwen. Shoreline retreat at Titan's Ontario Lacus and Arrakis Planitia from Cassini Imaging Science Subsystem observations. 2011;
- Vallis, G. K., and Coauthors, 2018: Isca, v1.0: A framework for the global modelling of the atmospheres of Earth and other planets at varying levels of complexity;
- Zhou, L., et al. 2010, *ApJ*, 718, 1243.