



REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA
ASSESSORATO DELLA DIFESA DELL'AMBIENTE
SERVIZIO ANTINQUINAMENTO ATMOSFERICO E ACUSTICO

**REALIZZAZIONE DELL'INVENTARIO REGIONALE DELLE SORGENTI DI
EMISSIONE, DEL DOCUMENTO SULLA VALUTAZIONE DELLA QUALITÀ
DELL'ARIA AMBIENTE IN SARDEGNA E INDIVIDUAZIONE DELLE POSSIBILI
MISURE DA ATTUARE PER IL RAGGIUNGIMENTO DEGLI OBIETTIVI DI CUI AL
D.LGS N. 351/99**

**VALUTAZIONE FINALE DELLA QUALITÀ DELL'ARIA, ZONIZZAZIONE
DEFINITIVA, PIANI DI RISANAMENTO E MANTENIMENTO**

APPENDICE A

O3 E NO2 SUL MEDITERRANEO OCCIDENTALE

SETTEMBRE 2005

Realizzazione del progetto a cura delle società

Progemisa S.p.a., Consorzio SAR s.r.l, Enviroware s.r.l., Orion s.r.l.



SOMMARIO

1	INTRODUZIONE	1
2	MECCANISMI DI FORMAZIONE DEGLI INQUINANTI SECONDARI	2
3	DESCRIZIONE DEL MODELLO	6
4	DESCRIZIONE DEI RISULTATI	9
4.1	Scenario base	11
4.1.1	Ozono	11
4.1.2	Biossido di azoto	16
4.1.3	NMVOC	19
4.2	Scenario con emissioni antropiche nulle	21
4.2.1	Ozono	21
4.2.2	Biossido di azoto	28
4.2.3	NMVOC	32
5	CONCLUSIONI	34
6	RIFERIMENTI	35

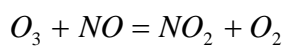
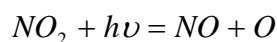
1 INTRODUZIONE

Nell’ambito del progetto ci si è avvalsi della consulenza del Dr. Robert J. Yamartino, sviluppatore del modello di dispersione fotochimica CALGRID. Il Dr. Yamartino, in collaborazione con il Dr. Stern dell’Università di Berlino, si è occupato della produzione di campi di concentrazione sul bacino occidentale del Mediterraneo utilizzando il modello fotochimico di dispersione REM/CALGRID (RCG). Poiché l’ozono e il biossido di azoto sono inquinanti secondari, cioè che non vengono emessi direttamente in atmosfera ma si formano in essa a seguito di complesse reazioni chimiche che avvengono tra i precursori (ossidi di azoto e composti organici), le loro concentrazioni non sono così fortemente legate alle posizioni delle sorgenti emissive come invece accade per gli inquinanti primari. Per questo motivo si è ritenuto importante effettuare simulazioni su una scala comprendente la Sardegna ma anche altre importanti città italiane e straniere (Roma, Napoli, Marsiglia, Barcellona) le cui emissioni potrebbero avere effetti importanti sulla formazione dell’ozono in Sardegna.

Nel seguito sono illustrati i risultati di due scenari, uno scenario base in cui si considerano tutte le emissioni presenti nel dominio di calcolo (il Mediterraneo occidentale) e uno scenario in cui vengono azzerate le emissioni di origine antropica della Sardegna. La differenza tra le concentrazioni predette dal modello in questi due scenari fornisce un’indicazione importante in merito a cosa possa fare la Sardegna, al massimo ipotetico (cioè spegnendo tutte le sue emissioni), per migliorare il livello di qualità dell’aria relativamente agli inquinanti secondari sul proprio territorio.

2 MECCANISMI DI FORMAZIONE DEGLI INQUINANTI SECONDARI

Gli ossidi di azoto sono emessi dai processi di combustione, le principali sorgenti sono il traffico autoveicolare, gli impianti di riscaldamento ed alcuni processi industriali. Al momento della emissione il monossido di azoto costituisce circa il 95% degli NO_x (Seinfeld e Pandis, 1998). Una volta emessi in atmosfera gli NO_x subiscono una complessa serie di trasformazioni fisico chimiche contribuendo alla formazione di numerosi inquinanti secondari, in primo luogo l'ozono O₃. Fondamentale per la formazione dell'ozono in atmosfera è la presenza di biossido di azoto (NO₂) ottenuto per la maggior parte dall'ossidazione del monossido di azoto. Le principali reazioni chimiche che coinvolgono gli ossidi di azoto nella formazione dell'ozono sono le seguenti:



La prima reazione, che indica la fotolisi del biossido di azoto da parte di un fotone con lunghezza d'onda inferiore a 424 nm, è fondamentale poiché mette a disposizione un atomo di ossigeno (O) che può successivamente reagire con una molecola di ossigeno (O₂), seconda reazione, per dare una molecola di ozono (O₃). Nella seconda reazione M rappresenta una terza molecola, tipicamente O₂ o N₂ o anche un'altra, che ha il solo scopo di assorbire l'energia vibrazionale in eccesso. Una volta formato l'ozono reagisce con l'ossido di azoto per ridare una molecola di biossido di azoto e una molecola di ossigeno (terza reazione). Quest'ultima reazione è importante poiché spiega come di notte, cioè in assenza di radiazione solare e quindi delle prime due reazioni, le concentrazioni di ozono diminuiscano.

Queste tre reazioni da sole non possono spiegare gli alti livelli di ozono che si raggiungono in atmosfera, poiché tendono ad un equilibrio, dato che una molecola di O₃ è prodotta e una molecola di O₃ è distrutta, anche se con diverse velocità. Risulta fondamentale perciò la presenza di altri precursori, i composti organici volatili, che attraverso reazioni chimiche più o meno complesse mettono a disposizione molecole (radicale ossidrilico, OH, e radicale perossido, HO₂)

che come risultato finale provocano l’ossidazione dell’ossido di azoto a biossido di azoto. Quando l’equilibrio delle tre reazioni indicate sopra viene rotto ulteriore ozono può essere formato.

Le reazioni chimiche che provocano la formazione dell’ozono in atmosfera sono migliaia; le principali sono descritte ad esempio in Seinfeld e Pandis (1998). Tali reazioni non verranno riportate nel seguito, mentre saranno illustrati graficamente i processi che portano alla formazione di ozono e che coinvolgono ossidi di azoto e composti organici volatili.

I principali processi chimico fisici che coinvolgono gli ossidi di azoto durante il giorno sono rappresentati in Figura 1 mentre quelli attivi durante la notte sono rappresentati schematicamente in Figura 2.

Il tempo di residenza medio in atmosfera degli ossidi di azoto è piuttosto breve. Di circa 2-3 giorni per il monossido di azoto, fino a 6 per il biossido di azoto. Ciò fa pensare che possano intervenire meccanismi di rimozione naturali, che eliminino gli ossidi di azoto dall’atmosfera trasformandoli in acido nitrico (HNO_3), il quale poi precipita sotto forma di nitrati, con la pioggia o con la polvere. Non sono ancora ben chiari i meccanismi che permettono una trasformazione così veloce degli ossidi di azoto.

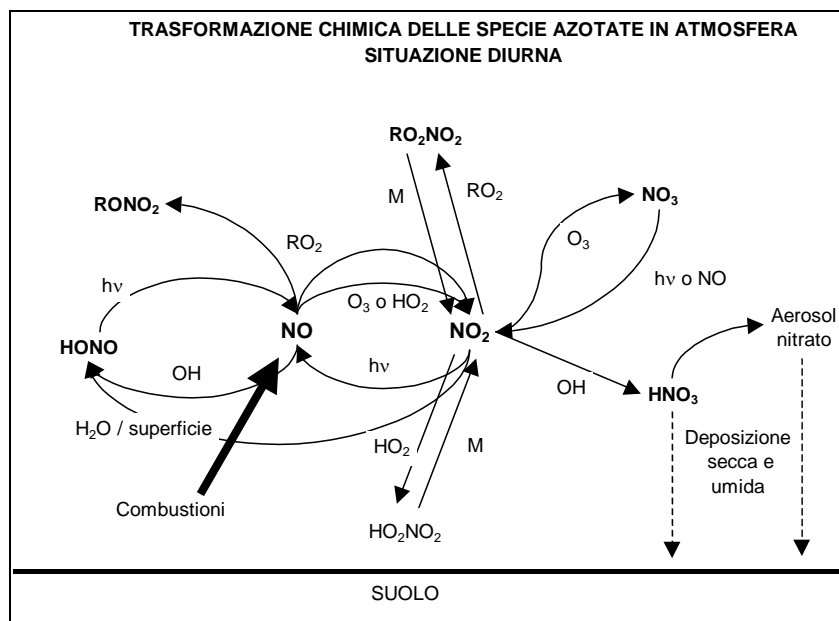


Figura 1 - Principali processi chimico fisici che coinvolgono gli ossidi di azoto durante le ore diurne. Fonte: Jenkin and Clemitshaw (2000)

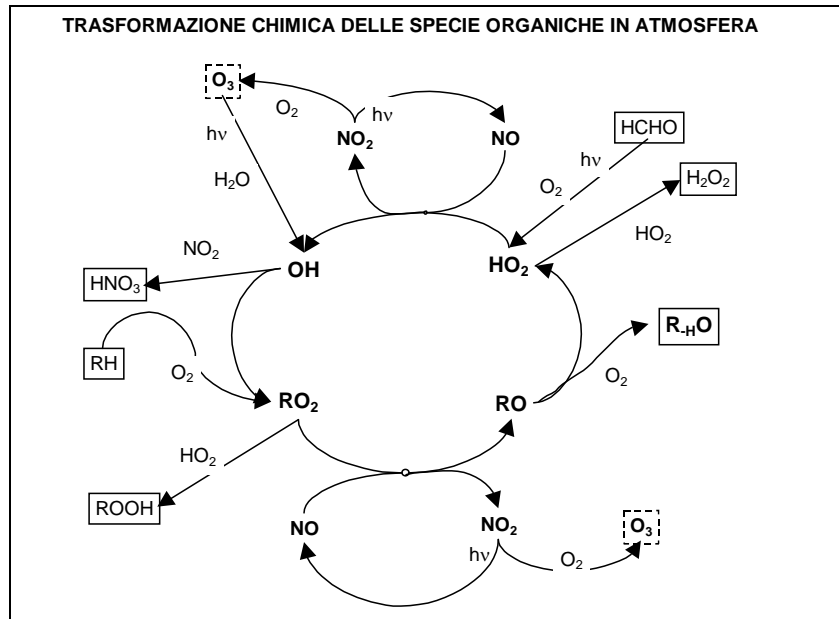


Figura 3 - Principali processi chimico fisici che coinvolgono i composti organici volatili.

Fonte: Jenkin and Clemitshaw (2000)

3 DESCRIZIONE DEL MODELLO

REM-CALGRID è un modello a scala urbana/regionale sviluppato per rispondere ai requisiti della direttiva della Commissione Europea sulla qualità dell’aria 96/62/EC (Stern et al., 2003). Per creare il nuovo modello REM-CALGRID (RCG) si è partiti da due modelli esistenti: il modello fotochimico a scala urbana CALGRID (Yamartino et al. 1992), e il modello meteorologico a scala regionale REM3 (Stern, 1994; Hass et al., 1997). L’idea era creare da questi un modello Euleriano di media complessità che potesse essere usato su entrambe le scale, urbana e regionale, per simulazioni di ossidanti e di formazione di aerosol sia a breve termine sia a lungo termine.

Tra le principali caratteristiche del modello RCG vi sono le seguenti:

- Un sistema di coordinate orizzontali generalizzato, incluse le coordinate in latitudine e longitudine;
- Uno schema di trasporto e diffusione verticale che tiene conto adeguatamente delle variazioni di densità dell’aria nello spazio e nel tempo, e considera tutte le componenti del flusso verticale, sia quando utilizzato con strati verticali fissati o con strati verticali dinamici;
- Una nuova metodologia per eliminare completamente gli errori introdotti nella simulazione del trasporto degli inquinanti con tecniche numeriche di tipo split operatoriale, e assicurare così che il calcolo di flussi di trasporto e conservazione della massa siano corretti;
- Uno schema veloce e molto accurato per l’avvezione degli inquinanti sviluppato da Walcek (2000);
- Aggiornamenti degli schemi di reazione fotochimica SAPRC-93 e CBM-IV, che includono lo schema di Carter (1996) per l’isoprene (tra i più importanti composti organici emessi dalla vegetazione) e l’ossidazione da SO₂ a SO₄;
- Due moduli per l’equilibrio degli aerosol che trattano la termodinamica degli aerosol inorganici;
- Un modulo per l’equilibrio degli aerosol che tratta la termodinamica degli aerosol organici;

- Semplici moduli che simulano l’emissione di aerosol di sale marino e di particelle di polvere portate dal vento;
- Un modulo per la rimozione degli inquinanti per deposizione umida.

Il modello RCG utilizza due diversi moduli per l’equilibrio degli aerosol:

- a) Il modulo MARS-A (Binkowski and Shankar, 1995) che considera la termodinamica degli aerosol inorganici contenenti solfati, nitrati e ammonio, e l’acqua;
- b) il modulo ISORROPIA che considera in aggiunta gli aerosol contenenti sodio e cloruro (Nenes et al., 1999). Gli aerosol organici secondari (SOA – Secondary Organic Aerosol) che si formano per condensazione dei prodotti di ossidazione degli idrocarburi biogenici e antropogenici sono trattati per mezzo del modulo SORGAM sviluppato da Schell et al. (2001).

Le emissioni di aerosol di sale marino sono trattate secondo la parametrizzazione di Gong et al. (1997) come funzione delle dimensioni dell’aerosol e della velocità del vento. Per il calcolo delle emissioni di polvere trasportata dal vento, che dipende dall’utilizzo del suolo, il modello considera i seguenti meccanismi di rilascio: rilascio diretto di piccole particelle di polvere dal vento (Loosmore and Hunt, 2000), e rilascio indiretto dalla collisione con grani di suolo più grandi, anch’essi sollevati dal vento ma che ricadono sulla superficie per via del loro peso (Claiborn et al., 1998).

Il modello RCG suddivide le componenti dell’aerosol, a seconda delle loro dimensioni, in due frazioni: una fine, PM_{2.5}, e una “grossa”, PM₁₀-PM_{2.5} (PMCO). I moduli sull’aerosol trattano la termodinamica degli aerosol inorganici in funzione della concentrazione in fase gas dell’acido nitrico, dell’ammoniaca, dell’acido solforico, dell’acido cloridrico, dell’umidità e della temperatura. Tutti gli aerosol secondari sono assegnati alla granulometria PM_{2.5}; tutti gli aerosol vengono trasportati e sono soggetti a deposizione umida e secca. Le concentrazioni di PM₁₀ sono definite dalla somma del PM₁₀ primario e degli aerosol secondari organici e inorganici secondo la relazione:

$$PM_{10} = PM_{2.5\text{ prim}} + PMCO_{\text{prim}} + SO_4 + NO_3 + NH_4 + SOA + Na + Cl$$

RCG usa il modello delle resistenze per il calcolo del rateo di deposizione secca come funzione dei parametri geofisici, delle condizioni micrometeorologiche, e del fatto che la specie inquinante sia in fase gassosa o aerosol. Per la fase aerosol viene determinata anche la velocità di *settling* gravitazionale dovuta al peso della particella inquinante. Le velocità di deposizione dipendono dalle specie e dal tipo di uso del suolo.

Le informazioni meteorologiche richieste dal modello RCG con frequenza oraria sono i campi tridimensionali di vento, temperatura, umidità e densità dell’aria, più i campi bidimensionali di altezza di rimescolamento, alcune variabili dello strato limite planetario, i ratei di precipitazione e la copertura nuvolosa. Tutti questi dati si ottengono da un’analisi meteorologica diagnostica basata su di una procedura d’interpolazione sulle superfici isentropiche. Il sistema utilizza tutti i dati disponibili in superficie e in quota (Reimer and Scherer, 1992).

Il modello RCG richiede in ingresso anche le emissioni annuali di NMVOC, NO_x, CO, SO₂, CH₄, NH₃, PM10, e PM2.5, divisi in sorgenti puntuali e sorgenti areali. Le emissioni di NMVOC vengono specieate utilizzando profili che dipendono dalla tipologia di sorgente e dal meccanismo chimico utilizzato. Le emissioni orarie sono calcolate in fase di simulazione dal modello stesso che utilizza fattori di forma mensili, giornalieri e orari specifici per le diverse tipologie di sorgenti.

Le condizioni al contorno laterali e sopra il dominio considerate per l’ozono hanno variazione mensile e sono dati di background climatologico (Logan, 1998). Per quanto riguarda tutte le altre specie le condizioni al contorno scelte sono i valori considerati tipici di background.

4 DESCRIZIONE DEI RISULTATI

Le simulazioni del modello RCG sul Mediterraneo occidentale hanno riguardato il periodo estivo del 2001 (maggio – settembre). Le griglie utilizzate hanno risoluzione pari a circa 15 km, per la precisione 0.250° lungo la longitudine e 0.125° lungo la latitudine. Il dominio di simulazione è quello rappresentato in Figura 4. Le emissioni utilizzate dal modello sono quelle stimate dal TNO (Het Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen TNO, Utrecht, <http://www.tno.nl/tno/index.xml>) per l’intera Europa; a titolo d’esempio la Figura 5 riporta le emissioni di ossidi di azoto (kt/anno) sul Mediterraneo occidentale per l’anno 2000. Si noti come un contributo importante a tali emissioni si trovi in corrispondenza delle principali rotte navali. Un dettaglio delle emissioni annuali di NO_x e NMVOC calcolate dal TNO sulla Sardegna ed attorno ad essa è mostrato in Figura 5. Come condizioni al contorno per l’ozono sono stati considerati valori climatologici con variazione mensile. Per ognuna delle altre specie invece si è fissato un unico valore tipico di background. Per quanto riguarda la risoluzione verticale si sono fissati 10 livelli di ampiezza costante, con un’altezza totale di di 3500m.

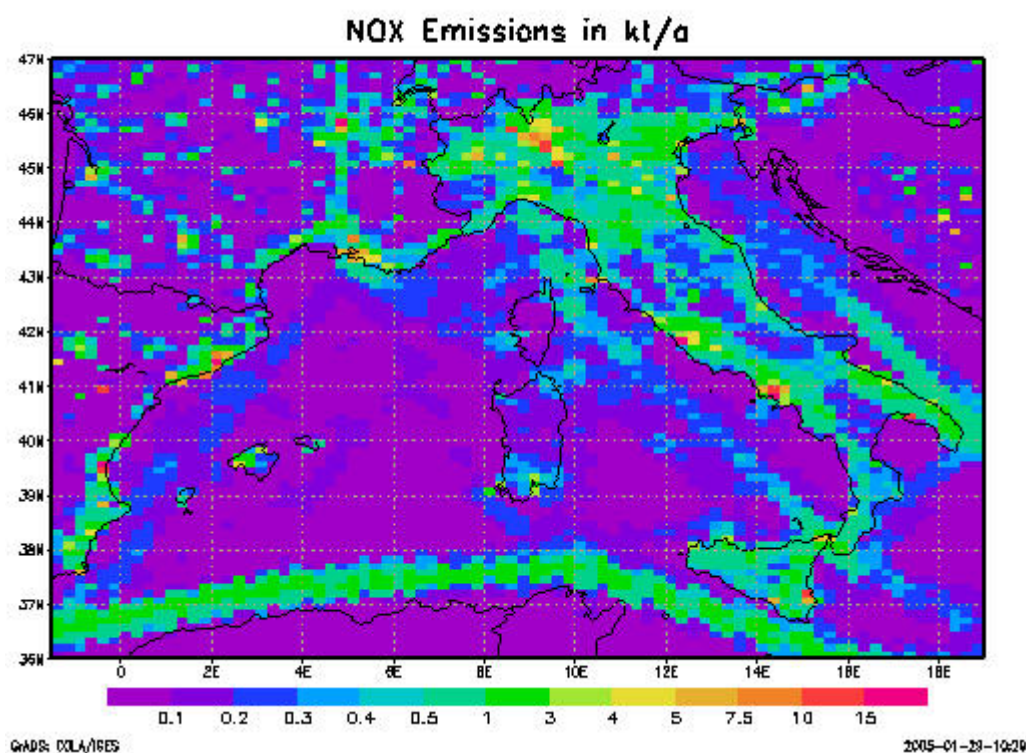


Figura 4 - Emissioni di NO_x sul Mediterraneo occidentale

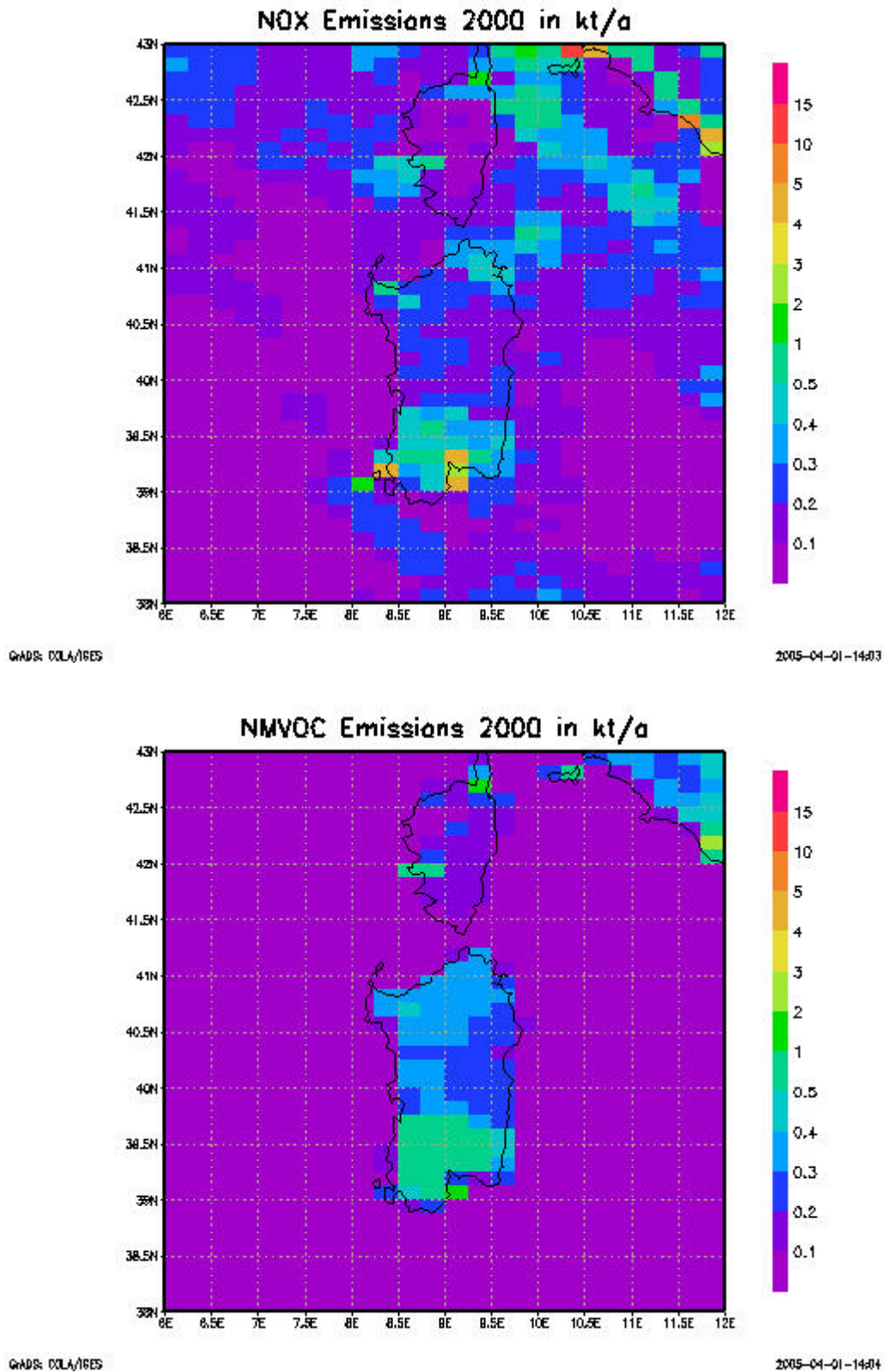


Figura 5 - Emissioni annuali relative all'anno 2000 di NO_x e NMVOC sulla Sardegna

4.1 SCENARIO BASE

4.1.1 OZONO

La Figura 6 mostra le concentrazioni medie di ozono sul periodo di simulazione (maggio – settembre 2001), mentre la Figura 7 mostra le medie dei massimi giornalieri predette dal modello RCG sul Mediterraneo occidentale. La Figura 8 e la Figura 9 mostrano le stesse variabili con uno zoom sulla Sardegna; le scale cromatiche di queste due figure sono state cambiate per mostrare maggiori dettagli.

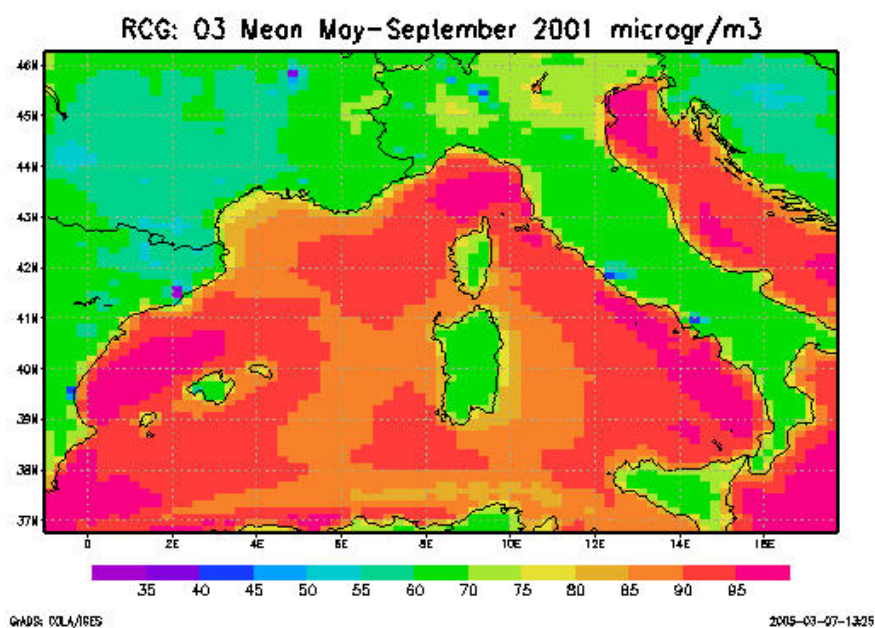


Figura 6 - Concentrazioni medie di O₃ in µg/m³ sul Mediterraneo occidentale per il periodo maggio – settembre 2001

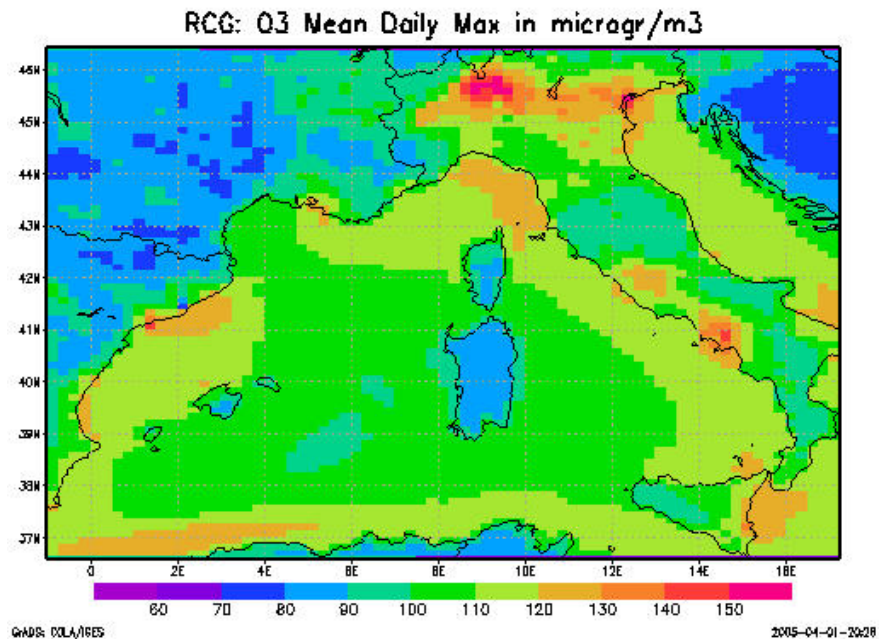


Figura 7 - Valori medi delle concentrazioni massime giornaliere di O₃ in µg/m³ sul Mediterraneo occidentale per il periodo maggio – settembre 2001

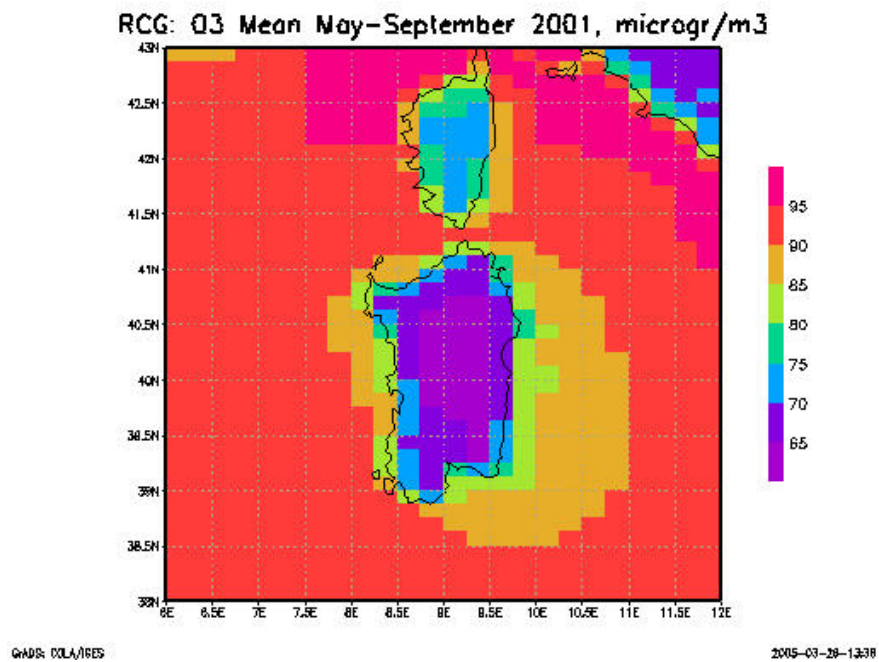


Figura 8 - Concentrazioni medie di O₃ in µg/m³ calcolate sul Mediterraneo occidentale per il periodo maggio – settembre 2001 (zoom sulla Sardegna)

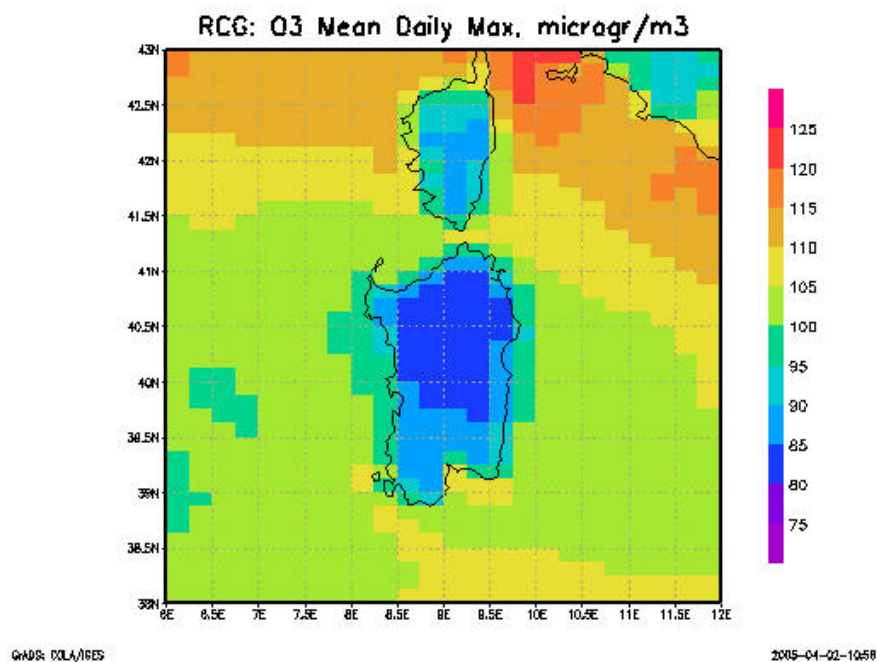


Figura 9 - Valori medi delle concentrazioni massime giornaliere di O₃ in µg/m³ calcolate sul Mediterraneo occidentale per il periodo maggio – settembre 2001 (zoom sulla Sardegna)

I valori medi estivi di ozono più elevati si trovano sul mare in prossimità delle coste italiane e spagnole. Sulla penisola italiana, le concentrazioni maggiori sono calcolate sulla valle del Po. Spostandosi dal mare verso la Sardegna le concentrazioni vanno via via diminuendo fino a raggiungere valori minimi in corrispondenza dell’isola stessa. Infatti, i valori medi estivi di O₃ sul mare attorno alla Sardegna (media su 5 mesi) sono caratterizzati da valori elevati, circa 90 µg/m³, mentre all’interno dell’isola si assestano a valori attorno a 65 µg/m³. Quest’ultimo valore è simile a quello predetto sopra le zone non densamente urbanizzate dell’Italia continentale.

L’isotropia dei valori di ozono, sia sulla Sardegna che in alcune parti dell’Italia, fa pensare che la differenza di concentrazione (65 contro 90) sia dovuta principalmente alla deposizione secca di O₃, piuttosto che ad emissioni di NO. La produzione di ozono, infatti, avviene in corrispondenza delle sorgenti dei precursori. Questo è evidenziato dalla distribuzione spaziale delle medie dei massimi giornalieri di ozono (Figura 7) che vede i suoi massimi vicino alle maggiori aree di emissione di NO_x e NMVOC, in corrispondenza delle città di Milano, Roma, Napoli, Barcellona, Valencia e Marsiglia.

L’ozono è trasportato dalla terra (da aree italiane o francesi o spagnole caratterizzate da elevate concentrazioni) al mare senza subire sostanziali riduzioni principalmente perché in mare aperto non si deposita e non ci sono sorgenti emissive di NO.

Data la grande distanza tra la Sardegna e le coste italiane, si potrebbe ipotizzare che il profilo verticale di O₃ sia piuttosto uniforme sopra il mare. I valori piuttosto elevati di O₃ sulla costa occidentale della Corsica sono probabilmente legati alle montagne relativamente alte che vi si trovano. In particolare essi potrebbero essere dovuti all’impatto sulle montagne di masse d’aria in quota provenienti dal mare con valori elevati di ozono.

Ignorando le emissioni di ossido di azoto, la diminuzione dei valori di O₃ in superficie rispetto ai valori in quota è dovuta ad un processo di equilibrio tra la diffusività turbolenta verticale e la velocità di deposizione alla base dello strato superficiale (cioè la parte dello strato limite atmosferico più vicina al suolo).

La transizione graduale dai valori elevati di ozono che si riscontrano sopra il mare ai valori inferiori che si riscontrano all’interno della Sardegna (si veda ad esempio la Figura 9) è tipica delle aree costiere ed è dovuta al processo di rimozione per deposizione secca. Tale rimozione graduale rappresenta uno svantaggio del vivere molto vicino al mare.

Sulla maggior parte dell’isola, la produzione locale di ozono non sembra essere sufficiente a contrastare il processo di rimozione per deposizione secca, ad eccezione della zona di Cagliari in cui tuttavia i valori più elevati si estendono sopra il mare a sud della città.

La Figura 10 mostra gli andamenti temporali delle medie giornaliere e dei massimi giornalieri di ozono all’interno della cella di calcolo contenente Cagliari. Si nota che i valori massimi predetti non sono molto elevati, infatti il rapporto tra i valori massimi giornalieri ed i valori medi giornalieri vale circa 2, ciò indica un contributo importante del background.

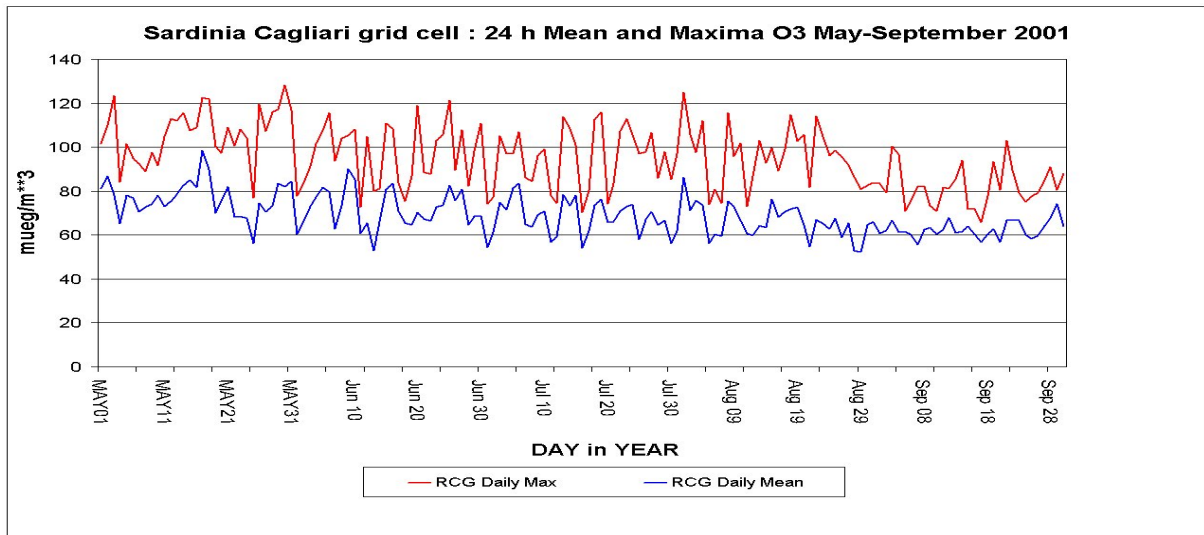


Figura 10 - Serie temporali di ozono calcolate sulla cella contenente Cagliari. Medie giornaliere e valori massimi giornalieri in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ per il periodo maggio - settembre 2001

4.1.2 BIOSSIDO DI AZOTO

La Figura 11 mostra le concentrazioni medie di biossido di azoto relative al periodo maggio – settembre 2001 predette dal modello RCG sul Mediterraneo occidentale. La Figura 12 è uno zoom della Figura 11 sulla Sardegna; la scala cromatica è stata cambiata per mostrare maggiori dettagli.

Il biossido di azoto, come l’ozono, è caratterizzato da bassi valori della velocità di deposizione sopra l’acqua. Tuttavia esso si converte abbastanza rapidamente (circa il 10% - 30% ogni ora) in composti, come ad esempio HNO_3 , che sono molto solubili in acqua e si depositano rapidamente sopra di essa. Per questo motivo le mappe di concentrazione di NO_2 ricordano abbastanza le mappe di emissione degli ossidi di azoto, come evidenziato dagli elevati livelli sopra le maggiori città italiane (Milano, Roma, Napoli) e sopra le città francesi e spagnole.

I valori di NO_2 ($< 1 \mu\text{g}/\text{m}^3$) che si riscontrano ad ovest della Sardegna sono inferiori rispetto a quelli predetti dal modello RCG ad est di essa ($1\text{-}2 \mu\text{g}/\text{m}^3$) probabilmente a causa dei maggiori tempi di trasporto dalle sorgenti situate in Spagna e Francia che non da quelle situate in Italia e dalle principali rotte di navigazione che passano tra l’isola e l’Italia (fonti di emissione di NO_x).

Dalla Figura 12 appare evidente l’effetto di Cagliari e delle rotte navali nella zona nord orientale della Sardegna (Olbia); quindi il controllo delle emissioni di NO da parte del traffico veicolare, delle imbarcazioni, degli aeromobili, e delle zone industriali attorno a Cagliari (Sarroch, Capoterra) potrebbe aiutare a diminuire i livelli di NO_2 sulla Sardegna.

La Figura 13 mostra gli andamenti temporali delle medie giornaliere e dei massimi giornalieri di biossido di azoto all’interno della cella di calcolo contenente Cagliari; per questo inquinante il rapporto tra i valori massimi giornalieri ed i valori medi vale circa 6.

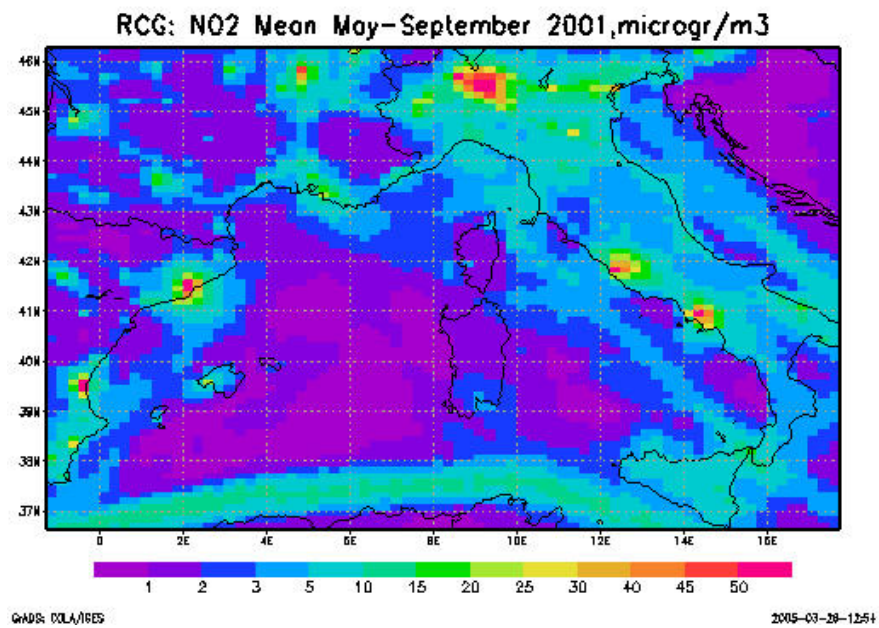


Figura 11 - Concentrazioni medie di NO₂ (µg/m³) sul Mediterraneo occidentale per il periodo maggio – settembre 2001.

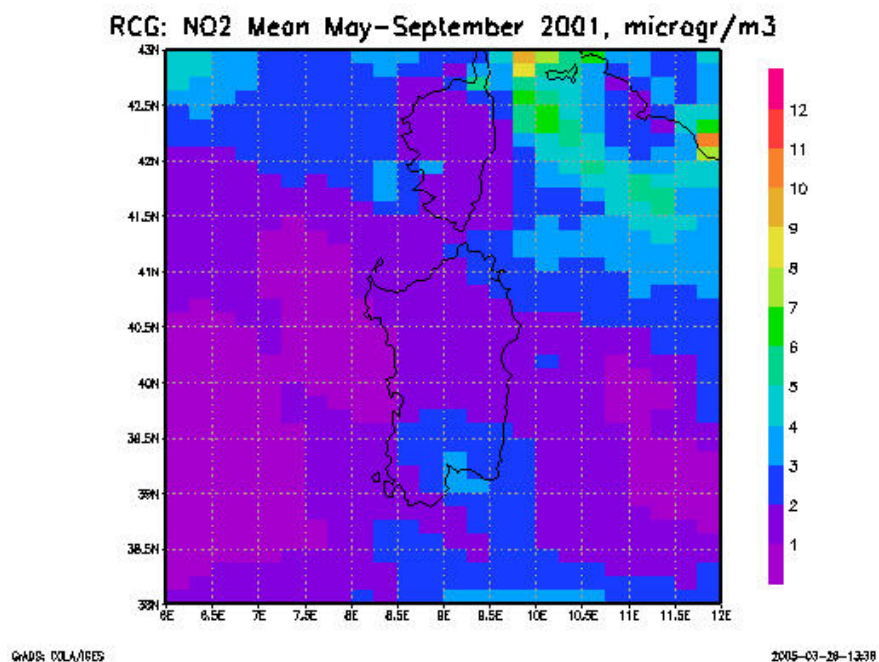


Figura 12 - Concentrazioni medie di NO₂ (µg/m³) sul Mediterraneo occidentale per il periodo maggio – settembre 2001 (zoom sulla Sardegna).

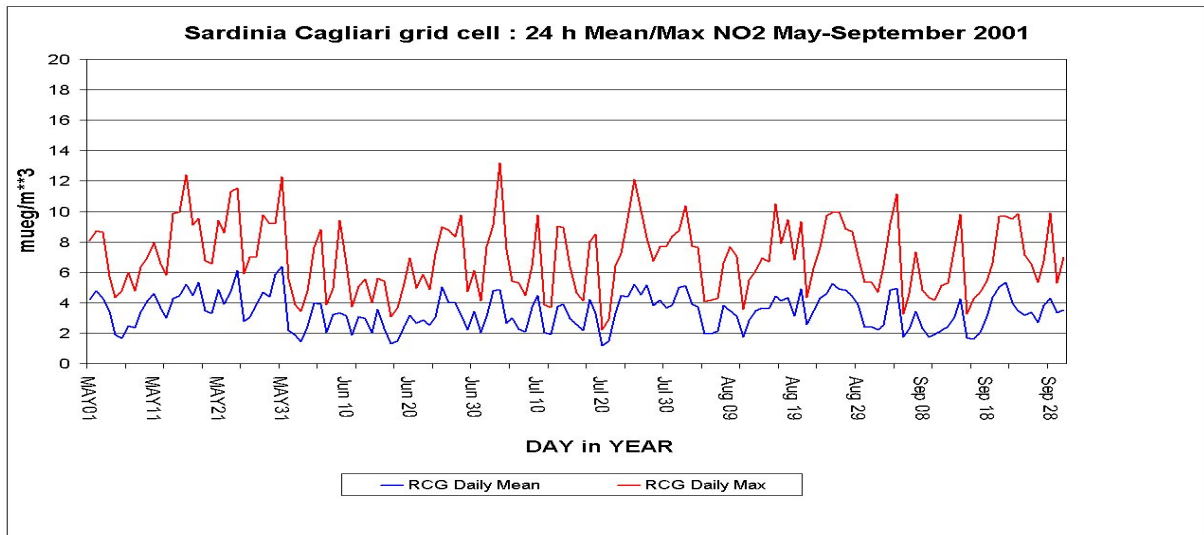


Figura 13 - Serie temporali di biossido di azoto calcolate nella cella contenente Cagliari. Medie giornaliere e valori massimi giornaliere in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ per il periodo maggio - settembre 2001.

4.1.3 NMVOC

In Figura 14 sono mostrati i valori medi di NMVOC nel periodo da Maggio a Settembre 2001 nel Mediterraneo occidentale, mentre in Figura 15 viene mostrato uno zoom sulla Sardegna (si noti la diversa scala cromatica). Nei valori considerati sono inclusi sia i composti organici antropici che quelli biogenici emessi dalla vegetazione. I valori massimi delle concentrazioni medie di NMVOC sono predetti sopra le grandi città italiane, francesi e spagnole; in Sardegna il valore massimo viene predetto a nord est di Cagliari e si attesta attorno ai $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

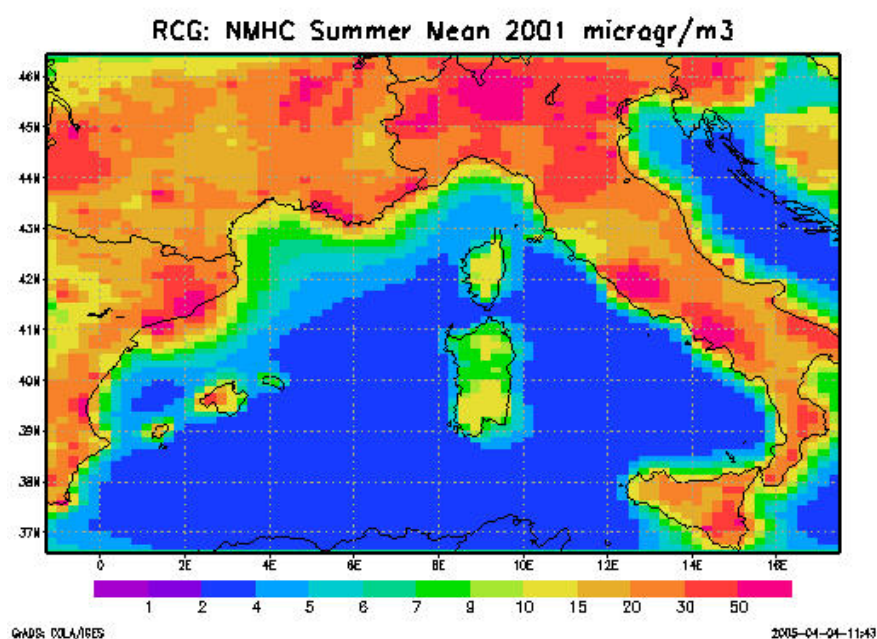


Figura 14 - Concentrazioni medie di NMVOC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) sul Mediterraneo occidentale per il periodo maggio - settembre 2001

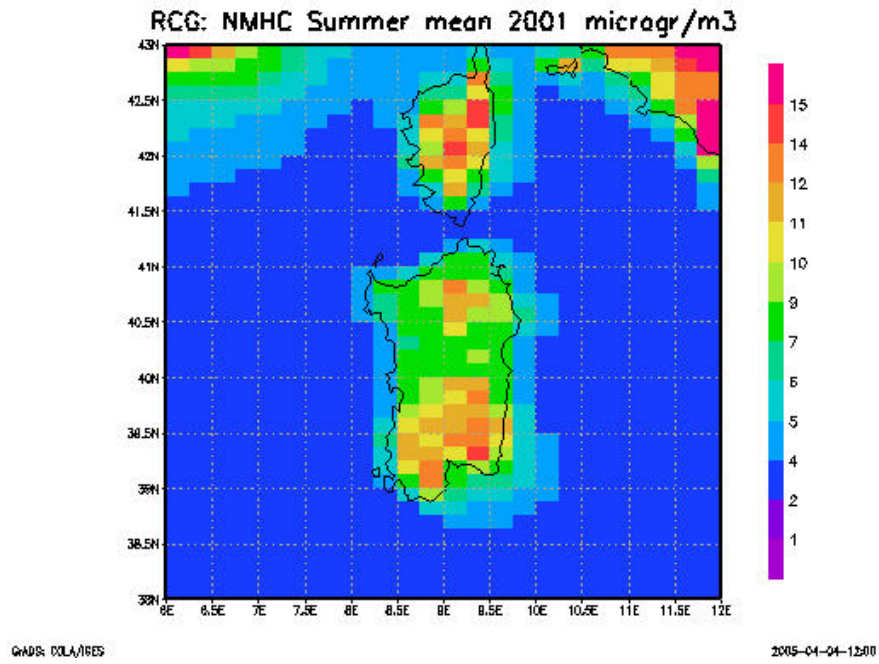


Figura 15 - Concentrazioni medie di NMVOC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) sul Mediterraneo occidentale per il periodo maggio – settembre 2001 (zoom sulla Sardegna)

4.2 SCENARIO CON EMISSIONI ANTROPICHE NULLE

In questo scenario i valori di concentrazione sul bacino occidentale del Mediterraneo vengono stimati “spegnendo” tutte le emissioni antropiche della Sardegna. Sono quindi azzerate tutte le emissioni di origine umana (traffico, industrie, riscaldamento, ecc.) e rimangono attive solo le emissioni di composti organici volatili dovute alla vegetazione. I risultati di questo scenario, che corrisponde in pratica ad ipotizzare che la Sardegna rimanga disabitata per un’intera estate, mostrano come variano le concentrazioni di ozono e biossido di azoto nell’ipotesi drastica di eliminare tutte le emissioni.

4.2.1 OZONO

Le concentrazioni medie di ozono sul Mediterraneo occidentale predette dal modello per lo scenario con emissioni nulle per la Sardegna sono mostrate in Figura 16. La Figura 17 mostra la differenza di concentrazione per l’ozono, espressa in $\mu\text{g}/\text{m}^3$, tra lo scenario senza emissioni per la Sardegna e lo scenario base. Si osserva che il contributo della Sardegna alla produzione di ozono si estende a sud est di essa ed arriva sino alla Sicilia; ciò è interessante perché se le emissioni della Sardegna hanno influenza sulle concentrazioni di ozono della Sicilia, si può immaginare quale sia l’influenza delle emissioni della Corsica o di città come Roma, Napoli o Marsiglia sui livelli di concentrazione della Sardegna.

La massima differenza nei valori medi di concentrazione di ozono che si riscontra tra i due scenari all’interno della Sardegna è pari a $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Figura 18), che corrisponde ad un decremento di circa l’8% rispetto allo scenario base. Le variazioni percentuali nelle concentrazioni di ozono rispetto allo scenario base sulla Sardegna variano dal 2% all’8% (Figura 19).

La Figura 20 mostra gli andamenti temporali delle concentrazioni medie giornaliere di ozono predette dal modello RCG all’interno della cella di calcolo contenente Cagliari per lo scenario base e per lo scenario con emissioni antropiche nulle per la Sardegna. Le differenze, come si può osservare non sono molto elevate e, in alcuni giorni, in funzione del tipo di circolazione atmosferica, le medie giornaliere relative ai due scenari sono identiche.

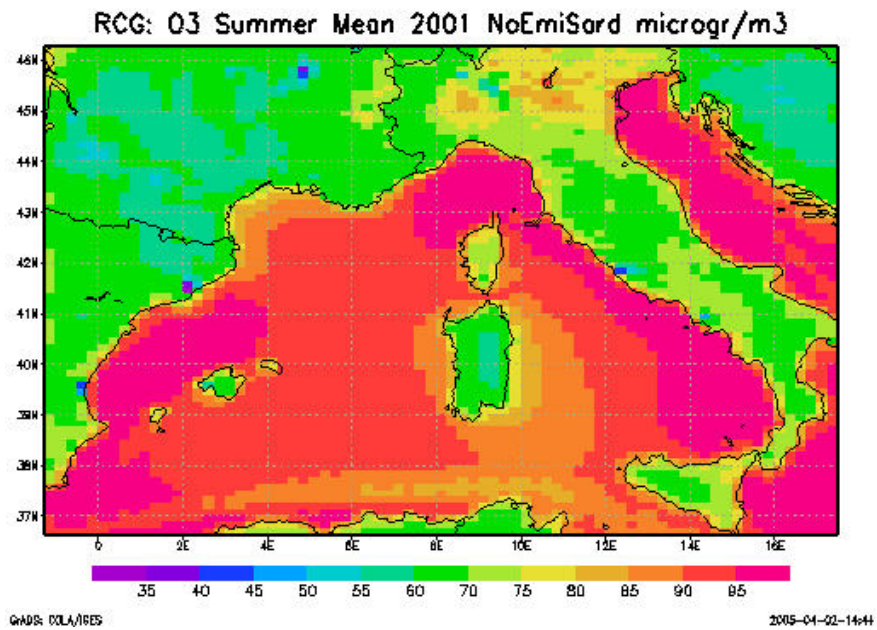


Figura 16 - Concentrazioni medie di ozono ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) sul Mediterraneo occidentale per il periodo maggio - settembre 2001 senza le emissioni dalla Sardegna.

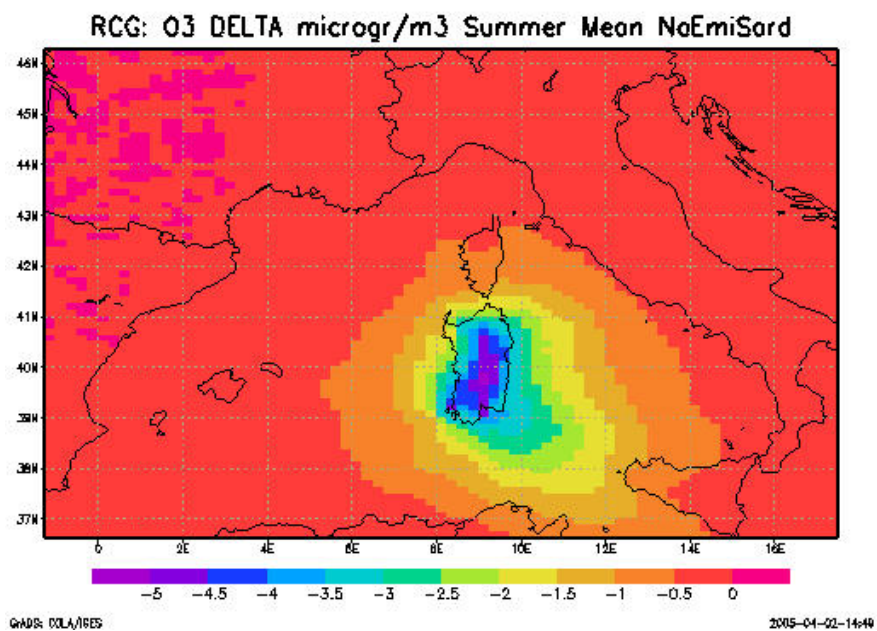


Figura 17 - Differenze ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) nelle concentrazioni medie di ozono (scenario senza le emissioni dalla Sardegna - scenario base) sul Mediterraneo occidentale.

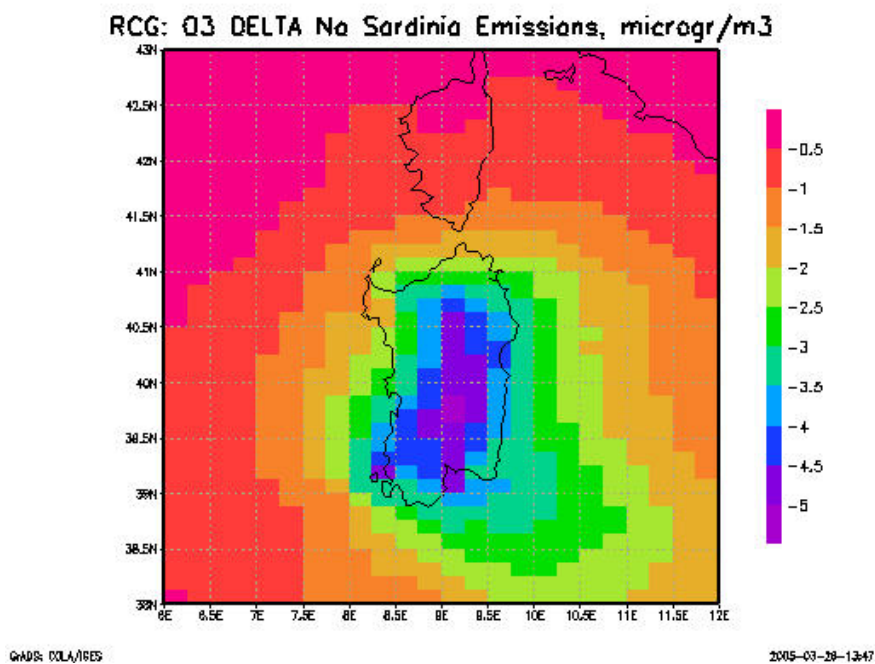


Figura 18 - Differenze ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) nelle concentrazioni medie di ozono (scenario senza le emissioni dalla Sardegna - scenario base) sul Mediterraneo occidentale (zoom sulla Sardegna)

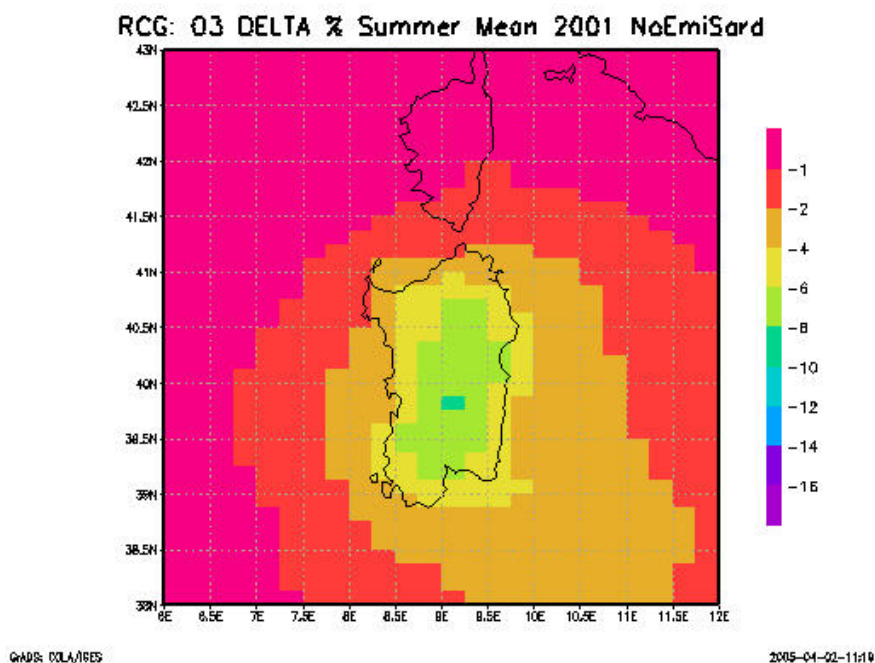


Figura 19 - Differenze (%) nelle concentrazioni medie di ozono (scenario senza le emissioni dalla Sardegna - scenario base) sul Mediterraneo occidentale (zoom sulla Sardegna).

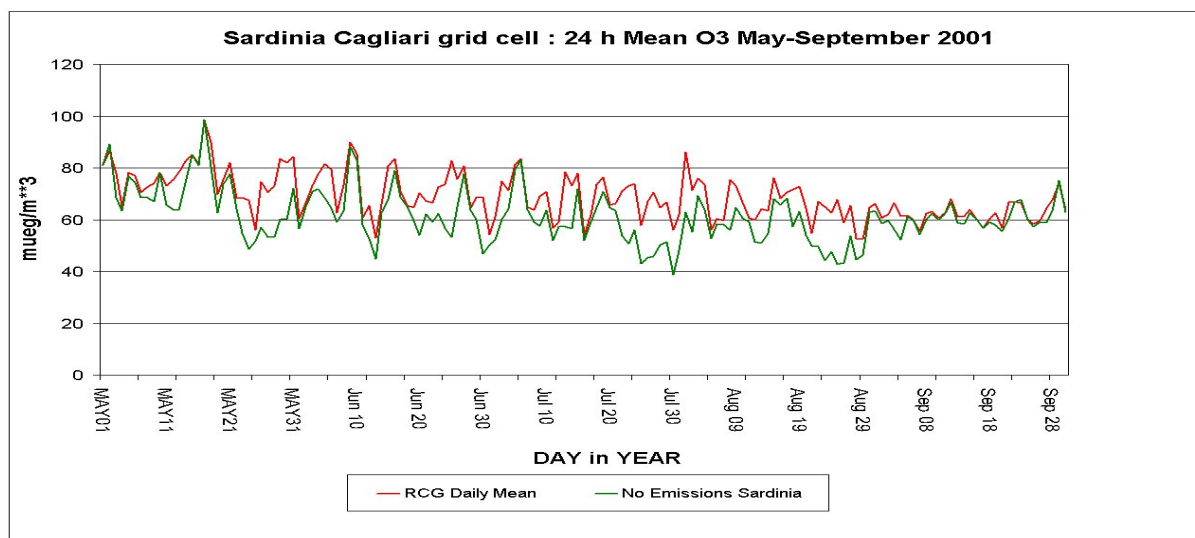


Figura 20 - Serie temporali di ozono calcolate sulla cella contenente Cagliari. Medie giornaliere in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ per il periodo maggio - settembre 2001. Scenario base e scenario con emissioni antropiche nulle.

L’effetto dell’azzeramento delle emissioni della Sardegna è più evidente quando si vanno a considerare le medie dei valori massimi delle concentrazioni giornaliere (Figura 21); anche per questo parametro l’influenza si estende fino alla punta occidentale della Sicilia. La mappa delle differenze tra i valori medi delle concentrazioni massime giornaliere nello scenario base e nello scenario con emissioni nulle è mostrata in Figura 22 e, con maggiore dettaglio per l’isola, in Figura 23. Si nota che le differenze variano all’incirca tra $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$, la variazione massima viene predetta attorno a Cagliari. In termini percentuali (Figura 24) queste variazioni sono comprese tra il 2% e il 14%; le differenze maggiori riguardano la parte meridionale della Sardegna.

La Figura 25 mostra gli andamenti temporali delle concentrazioni massime giornaliere di ozono predette dal modello RCG all’interno della cella di calcolo contenente Cagliari per lo scenario base e per lo scenario con emissioni antropiche nulle per la Sardegna. Si osserva che le differenze sono più evidenti rispetto alle differenze nelle concentrazioni medie giornaliere tra i due scenari (Figura 20), ciò indica un maggior contributo delle emissioni antropiche della Sardegna nel generare i picchi di concentrazione rispetto al contributo nel generare i valori medi.

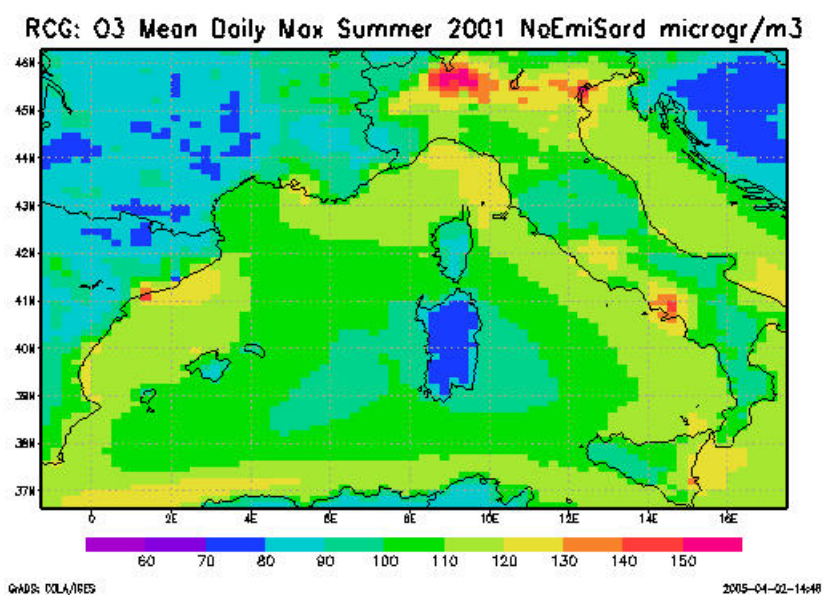


Figura 21 - Valori medi delle concentrazioni massime giornaliere di ozono ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) sul Mediterraneo occidentale per il periodo maggio - settembre 2001 senza le emissioni dalla Sardegna

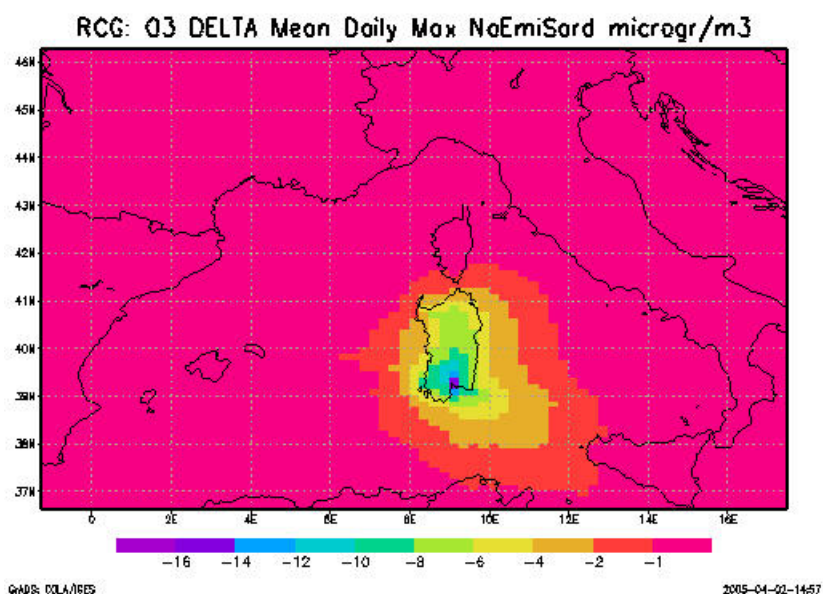


Figura 22 - Differenze ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) nei valori medi delle concentrazioni massime giornaliere di ozono (scenario senza le emissioni dalla Sardegna - scenario base) sul Mediterraneo occidentale.

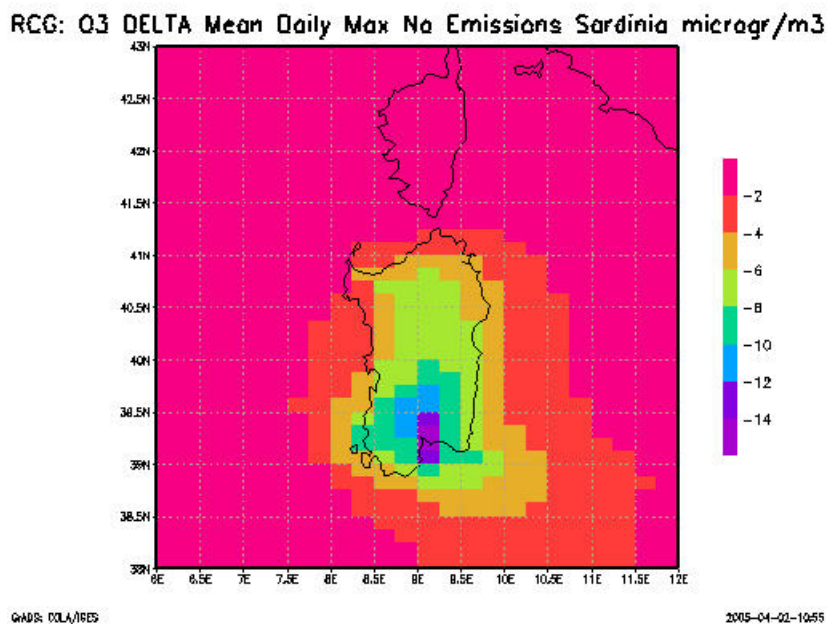


Figura 23 - Differenze ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) nei valori medi delle concentrazioni massime giornaliere di ozono (scenario senza le emissioni dalla Sardegna - scenario base) sul Mediterraneo occidentale (zoom sulla Sardegna)

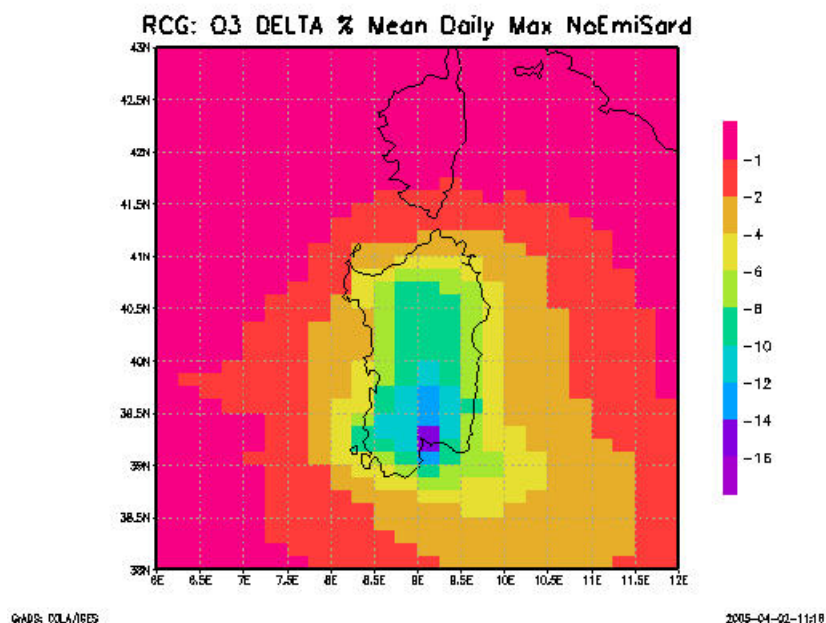


Figura 24 - Differenze (%) nei valori medi delle concentrazioni massime giornaliere di ozono (scenario senza le emissioni dalla Sardegna - scenario base) sul Mediterraneo occidentale (zoom sulla Sardegna)

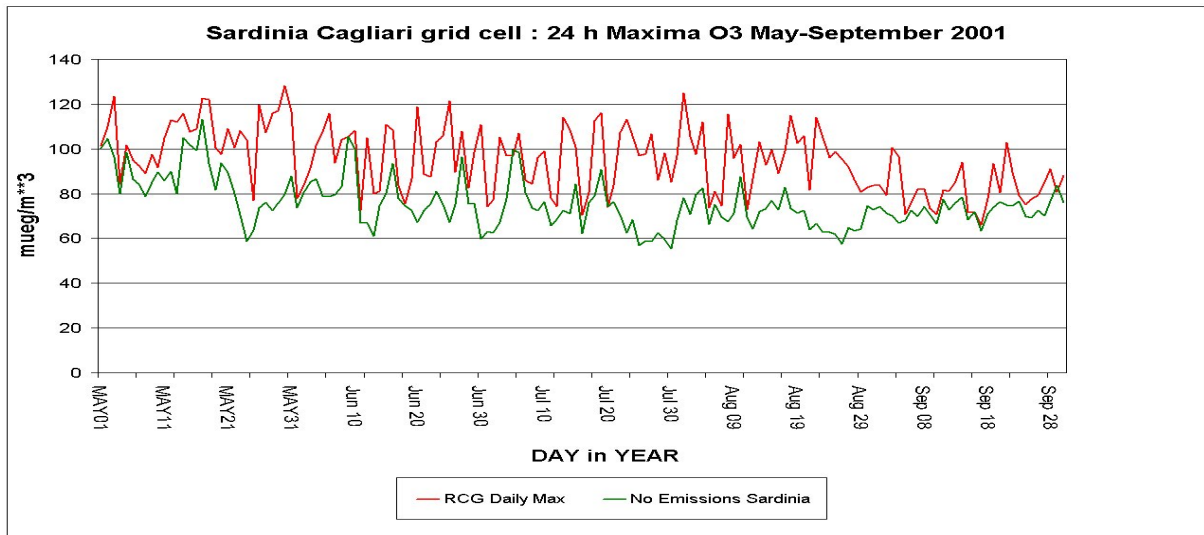


Figura 25 - Serie temporali di ozono calcolate sulla cella contenente Cagliari. Valori massimi giornalieri in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ per il periodo maggio - settembre 2001. Scenario base e scenario con emissioni antropiche nulle.

4.2.2 BIOSSIDO DI AZOTO

La Figura 26 mostra le concentrazioni medie estive di NO₂ predette dal modello RCG sul Mediterraneo occidentale nello scenario caratterizzato da emissioni antropiche nulle per la Sardegna. Su quasi tutta l’isola i livelli di NO₂ scendono sotto 1 µg/m³, ad eccezione di qualche località costiera in cui si riscontrano concentrazioni poco superiori che possono essere attribuite ad attività navali in prossimità delle coste dell’isola. La differenza tra le concentrazioni di biossido di azoto predette per il presente scenario e quelle predette per lo scenario base viene mostrata in Figura 27; si nota che l’effetto dello spegnimento delle sorgenti emissive è più localizzato per il biossido di azoto che non per l’ozono, le differenze infatti diventano nulle appena fuori dalla Sardegna, e non si estendono fino alla Sicilia come per l’ozono. La maggiore diminuzione nelle concentrazioni medie di NO₂ riguarda la zona meridionale della Sardegna (Figura 28), in particolare attorno a Cagliari si ha un decremento di circa 2.5 µg/m³. La diminuzione percentuale delle concentrazioni di NO₂ è invece abbastanza elevata, attestandosi attorno al 60% - 70%, su buona parte della Sardegna (Figura 29).

La Figura 30 mostra gli andamenti temporali delle concentrazioni medie giornaliere di biossido di azoto predette dal modello RCG all’interno della cella di calcolo contenente Cagliari per lo scenario base e per lo scenario con emissioni antropiche nulle per la Sardegna. Si osserva che le differenze sono elevate e confermano che una parte importante del biossido di azoto è dovuta alle emissioni delle sorgenti situate nell’isola.

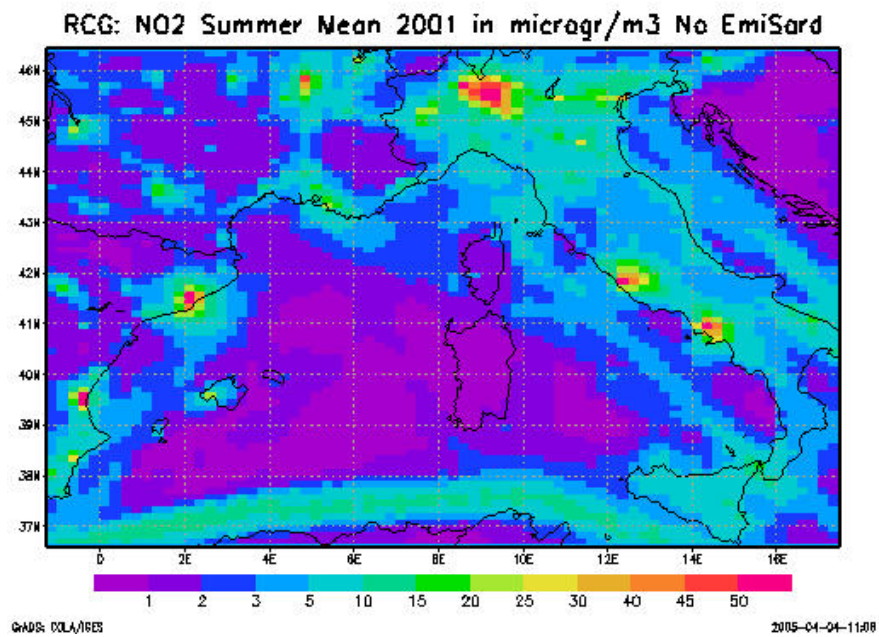


Figura 26 - Concentrazioni medie di biossido di azoto ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) sul Mediterraneo occidentale per il periodo maggio - settembre 2001 senza le emissioni dalla Sardegna.

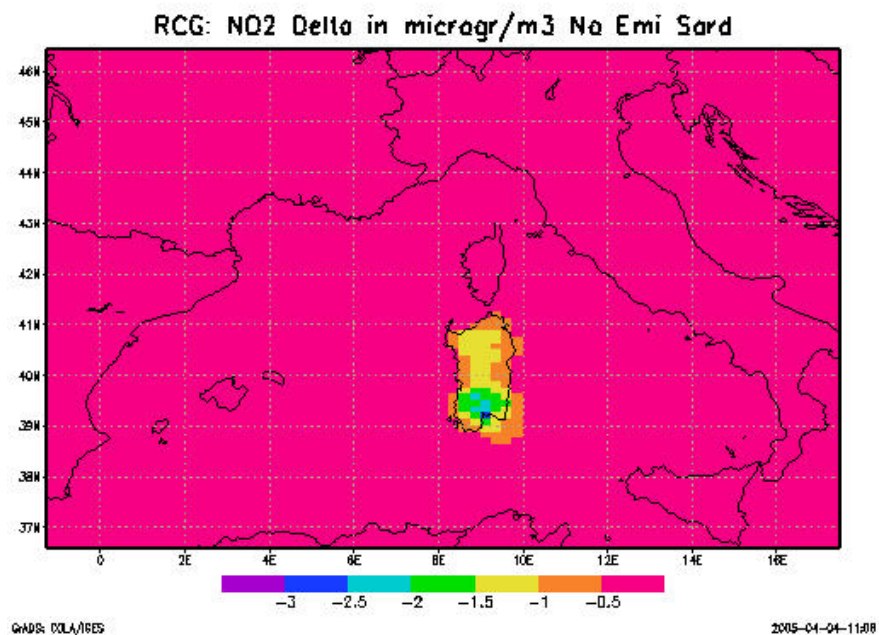


Figura 27 - Differenze ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) nelle concentrazioni medie di biossido di azoto (scenario senza le emissioni dalla Sardegna - scenario base) sul Mediterraneo occidentale.

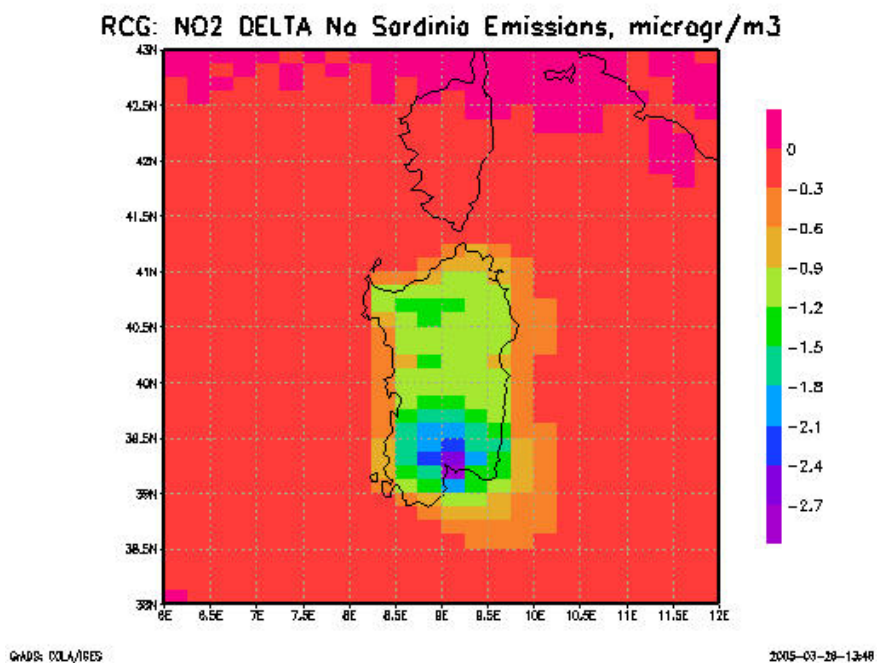


Figura 28 - Differenze ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) nelle concentrazioni medie di biossido di azoto (scenario senza le emissioni dalla Sardegna - scenario base) sul Mediterraneo occidentale (zoom sulla Sardegna).

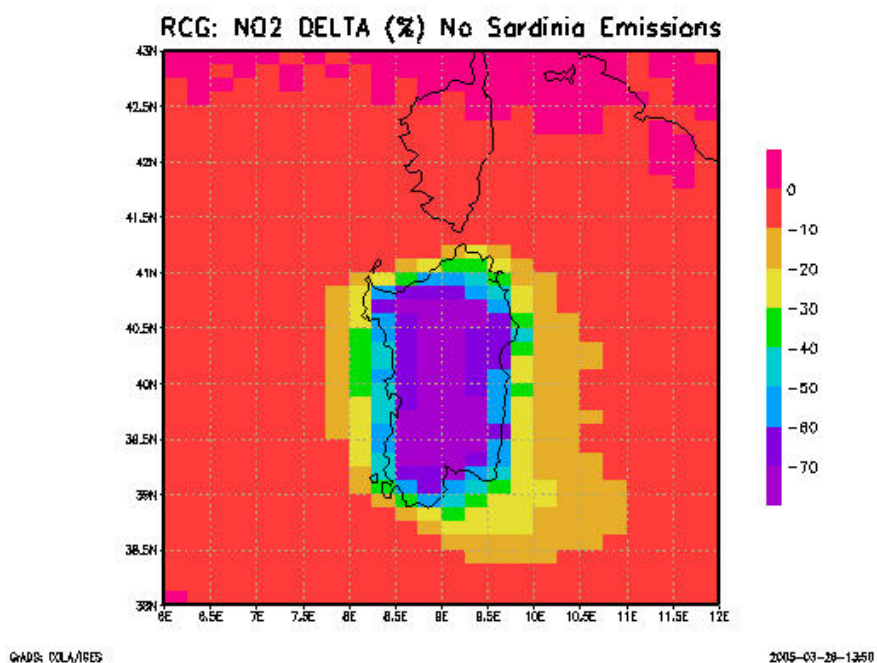


Figura 29 - Differenze (%) nelle concentrazioni medie di biossido di azoto (scenario senza le emissioni dalla Sardegna - scenario base) sul Mediterraneo occidentale (zoom sulla Sardegna).

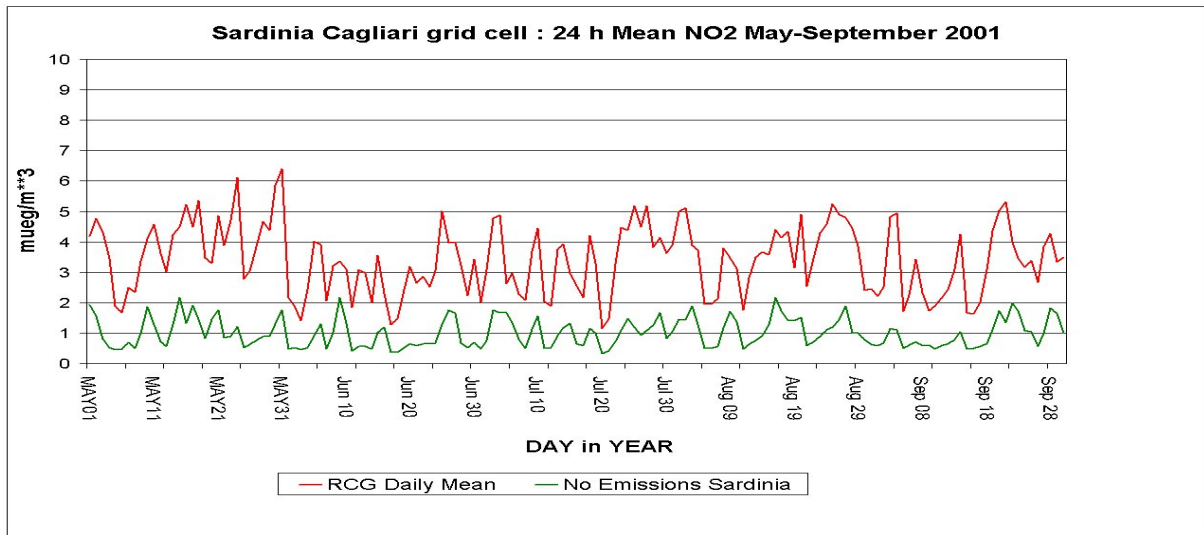


Figura 30 - Serie temporali di biossido di azoto calcolate sulla cella contenente Cagliari. Medie giornalieri in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ per il periodo maggio - settembre 2001. Scenario base e scenario con emissioni antropiche nulle.

4.2.3 NMVOC

La differenza tra le concentrazioni medie di NMVOC predette per lo scenario attuale e per lo scenario base viene mostrata in Figura 31 in termini di $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ed in Figura 32 in termini percentuali; entrambe le figure si riferiscono al dettaglio sulla Sardegna. E’ interessante notare come la diminuzione di concentrazioni che si ottiene escludendo il contributo delle emissioni dalla Sardegna nelle simulazioni è minore per gli idrocarburi non metanici di quanto non lo sia per il biossido di azoto; questa apparente differenza di comportamento del modello RCG è in realtà dovuta al contributo degli idrocarburi biogenici poiché che le emissioni considerate nulle nello scenario sono solo quelle relative agli idrocarburi antropici.

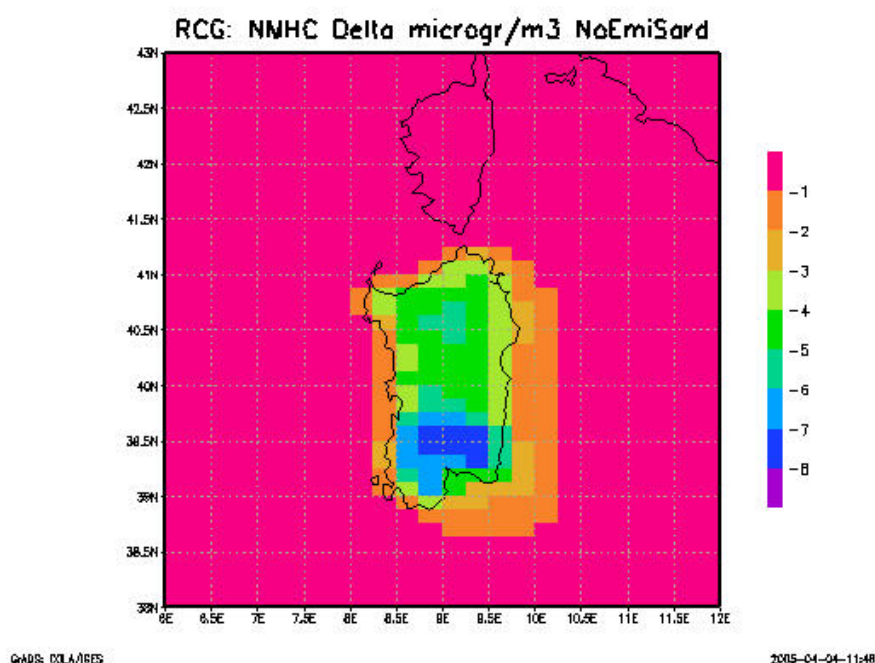


Figura 31 - Differenze ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) nelle concentrazioni medie di NMVOC (scenario senza le emissioni dalla Sardegna - scenario base) sul Mediterraneo occidentale (zoom sulla Sardegna).

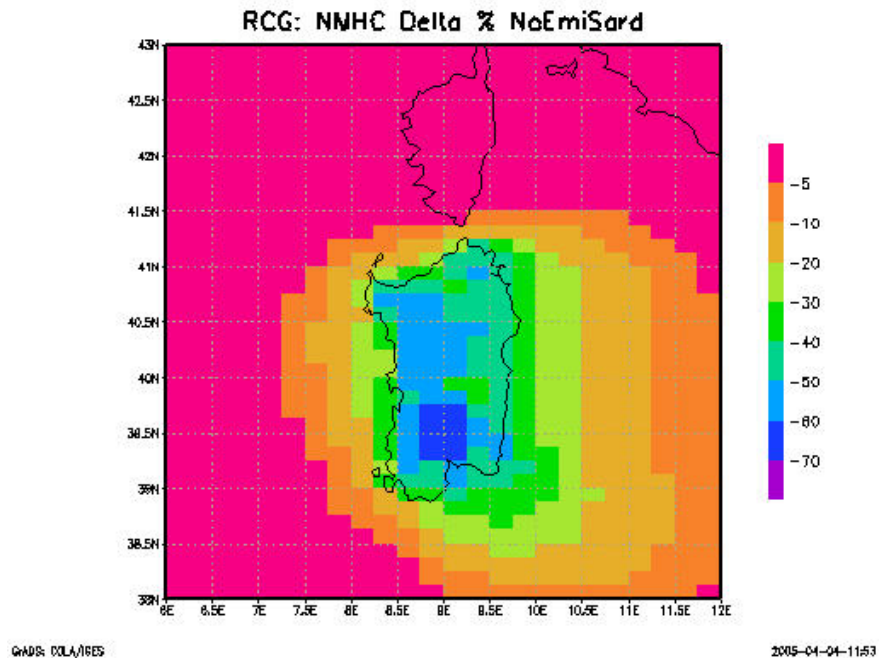


Figura 32 - Differenze (%) nelle concentrazioni medie di NMVOC (scenario senza le emissioni dalla Sardegna - scenario base) sul Mediterraneo occidentale (zoom sulla Sardegna).

5 CONCLUSIONI

I risultati delle simulazioni condotte hanno mostrato che per quanto riguarda i valori medi delle concentrazioni di ozono non c’è nulla che la Sardegna, da sola, possa fare per ridurre i propri livelli di ozono (a parte soluzioni non realistiche come aumentare le emissioni di NO o modificare drasticamente il proprio uso del suolo). Invece una riduzione delle emissioni dei precursori dell’ozono ha effetti positivi sui valori di picco di questo inquinante, soprattutto nella parte meridionale dell’isola; si osserva tuttavia che lo spegnimento totale di tutte le sorgenti dell’isola ha provocato una riduzione dei massimi giornalieri di circa il 14% nella zona di Cagliari e di una quantità variabile tra il 6% e l’8% in una buona parte del resto dell’isola. Poiché l’azzeramento di tutte le emissioni antropiche non è assolutamente fattibile nella realtà, una diminuzione delle emissioni dei precursori avrà sicuramente effetti minori rispetto a quelli ottenuti dalle simulazioni condotte.

Una diminuzione dei livelli di ozono sembra possibile solo nell’ambito di uno sforzo comune dei paesi dell’Europa meridionale; questo è in linea con la “Decisione della Commissione del 19 marzo 2004 concernente orientamenti per l’attuazione della direttiva 2002/3/CE del Parlamento europeo e del Consiglio relativa all’ozono nell’aria” 2004/279/CE, dove si afferma che “soltanto mediante drastiche riduzioni permanenti e su larga scala delle emissioni dei precursori dell’ozono si può ottenere una diminuzione sostenibile delle concentrazioni di picco dell’ozono e dei livelli generali dell’ozono nelle aree urbane e rurali in tutta l’Unione europea.”.

Per quanto riguarda l’altro inquinante reattivo di interesse, il biossido di azoto, le cose stanno invece diversamente: lo spegnimento delle sorgenti antropiche provoca una diminuzione delle concentrazioni attorno al 60% - 70%. E’ quindi importante intraprendere azioni che portino ad una diminuzione delle emissioni di ossidi di azoto, ad esempio diminuendo le emissioni industriali (soprattutto nella parte meridionale dell’isola che ha i valori assoluti più alti), quelle dovute al traffico e alla navigazione.

6 RIFERIMENTI

- Binkowski, F. S. and Shankar, U., The Regional Particulate Matter Model, 1. Model description and preliminary results. *J. Geophys. Res.* 100, D12, 26191-26209 (1995)
- Carter, W.; Condensed atmospheric photooxidation mechanisms for isoprene, *Atmos. Environ.* 30 (1996) 4275-4290.
- Claiborn et al. (1998). Regional measurements and modeling of windblown agricultural dust: The Columbia Plateau PM10 program. *J.G.R. VOL 103, D16, 19753-19767* .
- Gong, S. L., Barrie, L. A. and Blanchet J.-P. (1997). Modelling sea-salt aerosols in the atmosphere. 1. Model development. *J. Geophys. Res.*, 102, 3805-3818
- Hass, H., Builtjes, P. J. H., Simpson, D., and Stern, R., Comparison of model results obtained with several European regional air quality models, *Atmos. Env. 31 (1997), 3259-3279*.
- Hass, H., van Loon, M., Kessler, C., Matthijsen, J., Sauter, F., Stern, R., Zlatev, R., Langner, J., Fortescu, V., Schaap, M., Aerosol Modeling: Results and Intercomparison from European Regional-scale Modeling Systems. A contribution to the EUROTRAC-2 subproject GLOREAM. EUROTRAC report 2003.
- Jenkin M.E. and Clemitshaw K.C. (2000). Ozone and secondary photochemical pollutants: chemical processes governing their formation in the planetary boundary-layer. *Atmospheric Environment* 34, 2499–2527.
- Logan, J. (1998); An analysis of ozonesonde data for the troposphere, recommendations for testing 3-D models and development of a gridded climatology for tropospheric ozone, *J. Geophys. Res.* 104, 16, 1998
- Loosmore and Hunt: dust resuspension without saltation (2000). *J. Geophys. Res.* Vol 105, D16, 20,663 ff, August 27, 2000
- Nenes, A., Pilinis, C., and Pandis, S. N., Continued Development and Testing of a New Thermodynamic Aerosol Module for Urban and Regional Air Quality Models, *Atmos. Env. 33 (1999), 1553-1560*.

Reimer, E. and Scherer, B., An operational meteorological diagnostic system for regional air pollution analysis and long-term modelling, in: *Air Pollution Modelling and its Applications IX.*, van Doop, H., ed., Plenum Press 1992.

Roemer, M., Beekmann, M., Bergström, R., Boersen, G., Feldmann, H., Flatøy, F., Honore, C., Langner, J., Jonson, J., Matthijssen, J., Memmesheimer, J., Simpson, D., Smeets, P., Solberg, S., Schell, B., I.J. Ackermann, H. Hass, F.S. Binkowski, A. Ebel: Modeling the formation of secondary organic aerosol within a comprehensive air quality modeling system. *J. Geophys. Res.*, 106, 28275 - 28293.

Seinfeld J.H. and Pandis S.N. (1998). Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change. John Wiley & Sons, Inc.

Simpson, D., A. Guenther, C.N. Hewitt, R. Steinbrecher: Biogenic emissions in Europe, 1. estimates and uncertainties, *Journal of Geophysical Research*, vol. 100, No. D11, pp. 22,875-22,890, 1995.

Stern R., Entwicklung und Anwendung eines dreidimensionalen photochemischen Ausbreitungsmodells, *Meteorologische Abhandlungen Serie A, Band 8, Institut für Meteorologie der FU-Berlin, 1994.*

Stern, R., Yamartino, R., Graff, A.; Dispersion Modelling within the European Community's Air Quality Framework Directive: Long Term Modelling of O₃, PM₁₀ and NO₂. 26th ITM on Air Pollution Modelling and its Application. May 26-30, 2003, Istanbul, Turkey

Stern, R., Stevenson, D., Zandveld, P., Zlatev, Z., Ozone trends according to ten dispersion models. A contribution to the EUROTRAC-2 subproject TOR. *EUROTRAC report 2003.*

Walcek, C.J.; Minor flux adjustment near mixing ratio extremes for simplified yet highly accurate monotonic calculation of tracer advection, *J. Geophys. Res.*, 105, D7 (2000), 9335-9348.

Yamartino, R.J., J. Scire, G.R. Carmichael, and Y.S. Chang; The CALGRID mesoscale photochemical grid model-I. Model formulation, *Atmos. Environ.*, 26A (1992), 1493-1512.