



Ricerca di Sistema elettrico

Preparazione di materiali nanostrutturati innovativi a base polimerica e compositi come assorbitori di etilene prodotto dalla frutta nelle fasi di stoccaggio

Maria Vittoria Russo, Ilaria Fratoddi, Iole Venditti

PREPARAZIONE DI MATERIALI NANOSTRUTTURATI INNOVATIVI A BASE POLIMERICA E COMPOSITI COME ASSORBITORI DI ETILENE PRODOTTO DALLA FRUTTA NELLE FASI DI STOCCAGGIO

Maria Vittoria Russo, Ilaria Fratoddi, Iole Venditti (Dipartimento di Chimica, Università Sapienza di Roma)

Settembre 2013

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2012

Area: Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica

Progetto: C1 "Risparmio di energia elettrica nei settori: civile, industria e servizi"

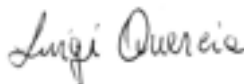
Obiettivo: "Tecnologie per l'industria del freddo"

Responsabile del Progetto: Ilaria Bertini, ENEA



Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Preparazione di materiali nano strutturati innovativi a base polimerica e compositi come assorbitori di etilene prodotto dalla frutta nelle fasi di stoccaggio"

Responsabile scientifico ENEA: Luigi QUERCIA



Responsabile scientifico Università di Roma: Maria Vittoria RUSSO

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
1.1 L'ETILENE: IL RUOLO NELLA MATURAZIONE DELLA FRUTTA.....	6
1.2 ASSORBITORI ED INIBITORI DELL'ETILENE	8
1.3 LA MATURAZIONE POST-RACCOLTA DELLA BANANA	8
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI	10
2.1 MATERIALI E METODI	10
2.2 RISULTATI E DISCUSSIONE	12
2.2.1 Fase I.....	12
2.2.2 Fase II.....	14
3 CONCLUSIONI.....	22
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	23
CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO IMPEGNATO NELL'ATTIVITÀ.....	25

Sommario

Nell'ambito di questo Progetto è stato sviluppato uno studio che mira alla comprensione degli effetti di materiali avanzati, quali polimeri, complessi metallici ed ibridi a base di complessi di metalli di transizione, sulla maturazione post-raccolta di frutti climaterici ed in particolare delle banane, attraverso processi di assorbimento dell'etilene. Sulla base della letteratura e attraverso uno screening mirato, sono stati sintetizzati e caratterizzati polimeri e complessi di metalli di transizione con i quali sono stati effettuati studi qualitativi e quantitativi per valutarne l'effetto di assorbimento di etilene prodotto dalla frutta climaterica.

Dai primi studi qualitativi, condotti nelle condizioni testate nel nostro laboratorio, a temperatura ed umidità ambientali, è emerso che è presente un effetto di inibizione del processo di maturazione da parte di film di $\text{PdCl}_2(\text{PBU}_3)_2$ in PPA > Pt-DEBP. Dal successivo studio quantitativo, realizzato mediante analisi colorimetrica è emerso che l'utilizzo di complessi contenenti siti metallici di Pd (II), Pt (II) e Co (II), consente un sostanziale assorbimento di etilene che si concretizza in una più lenta maturazione dei frutti, fino a 15 giorni rispetto al controllo.

Considerando le criticità di questo tipo di studi, che partono dal controllo di fattori quali lo stadio di maturazione, l'umidità, la temperatura, la precedente esposizione all'etilene o condizioni di crescita, i risultati ottenuti sono incoraggianti e saranno fondamentali per ulteriori e più precise determinazioni quantitative. Il risultato importante ottenuto da questo studio è stata l'individuazione, da una ampia gamma di potenziali assorbitori, di tre sistemi promettenti sui quali approfondire gli studi, ovvero i complessi quadrato planari del Pt(II) e del Pt(II), rispettivamente il *trans*- $\text{PtCl}_2(\text{PBU}_3)_2$ ed il *trans*- $\text{PdCl}_2(\text{PBU}_3)_2$ ed il composto CoCl_2 tutti depositati sotto forma di film all'interno di una matrice polimerica.

La prospettiva di questi studi sarà quella di ottimizzare le condizioni di temperatura ed umidità per riprodurre le condizioni di conservazione della frutta utilizzando frutti a diverso grado di maturazione, variando la percentuale di metallo nella matrice polimerica e realizzando sul sistema più promettente dei film nano strutturati con maggiore estensione superficiale.

1 Introduzione

Con questo Progetto è stato sviluppato uno studio che mira alla comprensione degli effetti di materiali avanzati, quali polimeri, complessi metallici ed ibridi a base di complessi di metalli di transizione, sulla maturazione post-raccolta di frutti climaterici ed in particolare delle banane. [1,2] Infatti, questi composti sono ottimi candidati nella prevenzione degli effetti etilene-indotti in una vasta gamma di frutti, attraverso l'assorbimento dell'etilene (C_2H_4).

Questo è di particolare interesse nel caso dei frutti climaterici, tra i quali banane, mango, pomodori e mele, in cui si assiste ad un pronunciato aumento della respirazione in corrispondenza della fase di ripenio [3].

In particolare le banane dopo la raccolta vengono trasportate ai mercati di destinazione ma, prima di arrivare alla fase di vendita al dettaglio, devono essere trattate con etilene per indurre la fase climaterica, durante la quale il frutto sviluppa le tipiche caratteristiche di aroma, gusto e colore che ne fanno un frutto particolarmente apprezzato da tutte le fasce di consumatori. Sebbene siano sufficienti concentrazioni di etilene nell'intervallo $10-50 \mu L L^{-1}$ [4], nella pratica commerciale vengono utilizzate concentrazioni di etilene in condizione di saturazione, dell'ordine di $500-1000 \mu L L^{-1}$ allo scopo di garantire una maturazione uniforme di polpa e buccia. Infatti, senza il trattamento con etilene la polpa dei frutti tende ad ammorbidire ma la buccia acquisisce una colorazione opaca giallo pallido, decisamente poco attraente a scopo commerciale.

Purtroppo, una volta indotto il climaterio con etilene, a seconda della varietà del frutto e delle condizioni di conservazione (temperatura, umidità, quantità di etilene esogeno), nel giro di 3-5 giorni si osserva un rapido decadimento qualitativo. Va inoltre ricordato che la banana, essendo un frutto tropicale, teme l'esposizione alle basse temperature, come mostrato in Fig. 1. Si possono avere lesioni da refrigerazione dopo l'esposizione di banane a temperature inferiori a $13^\circ C$ per poche ore fino a pochi giorni, a seconda della cultivar, della maturazione, e della temperatura. Inoltre i frutti refrigerati sono più sensibili al danno meccanico.

Risulta quindi di estremo interesse commerciale la ricerca di un mezzo che permetta un mantenimento delle caratteristiche qualitative durante la fase di conservazione e distribuzione delle banane.

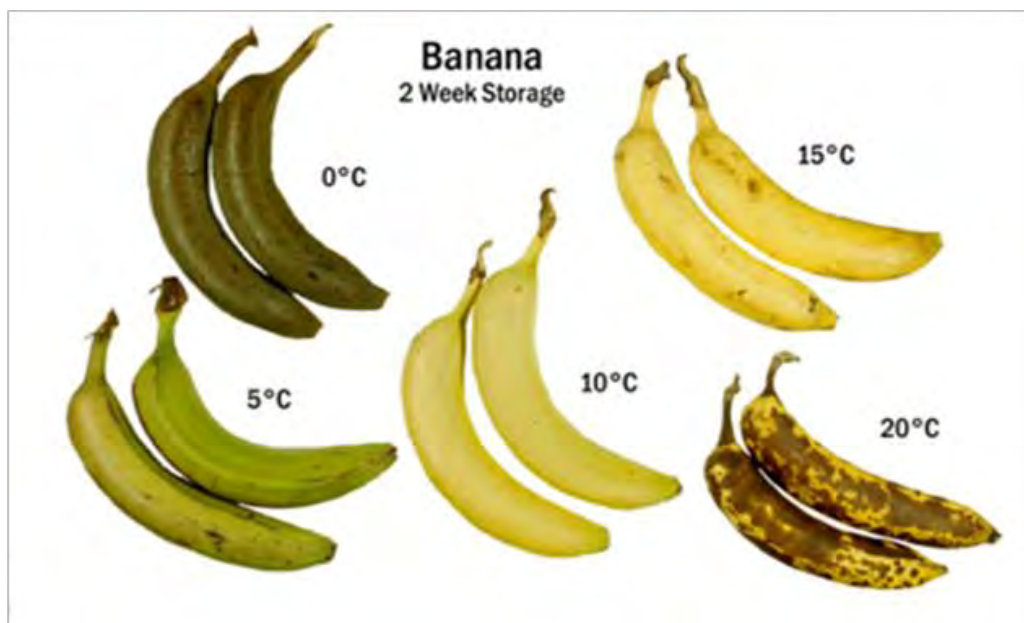


Fig. 1: Esempio di lesioni da refrigerazione dovute a esposizione di banane a temperature inferiori a $10^\circ C$: moderati danni da freddo sarà il risultato di esporre le banane mature-verdi per un'ora a $5^\circ C$. La conservazione per 2 settimane a temperature tra i 10 ed i $15^\circ C$ ne mantiene la qualità, per temperature maggiori si osserva un rapido invecchiamento. (<http://postharvest.ucdavis.edu/PFFruits/BananaPhotos/?repository=29277&a=83197>)

1.1 L'etilene: il ruolo nella maturazione della frutta

L'etilene è una delle più semplici molecole organiche dotate di attività biologica: questo idrocarburo gassoso insaturo è universalmente riconosciuto come responsabile della maturazione dei frutti ed è inoltre coinvolto nella regolazione di diversi processi metabolici nelle piante come la senescenza, l'abscissione, la crescita, la radicazione e molti altri aspetti dello sviluppo [5]. A causa del suo effetto sui tessuti vegetali riveste inoltre una rilevante importanza commerciale: per la sua implicazione nel processo di senescenza, importanti perdite di prodotto si verificano annualmente nel settore ortofrutticolo, perdite che diventano ancora più consistenti se si considerano quei paesi che non dispongono di mezzi e tecnologie tali da garantire ottimali condizioni di refrigerazione e trasporto.

A titolo d'esempio riportiamo in Fig. 2 lo schema studiato da Alexander e Grierson riguardo il ruolo dell'etilene nella maturazione del pomodoro.

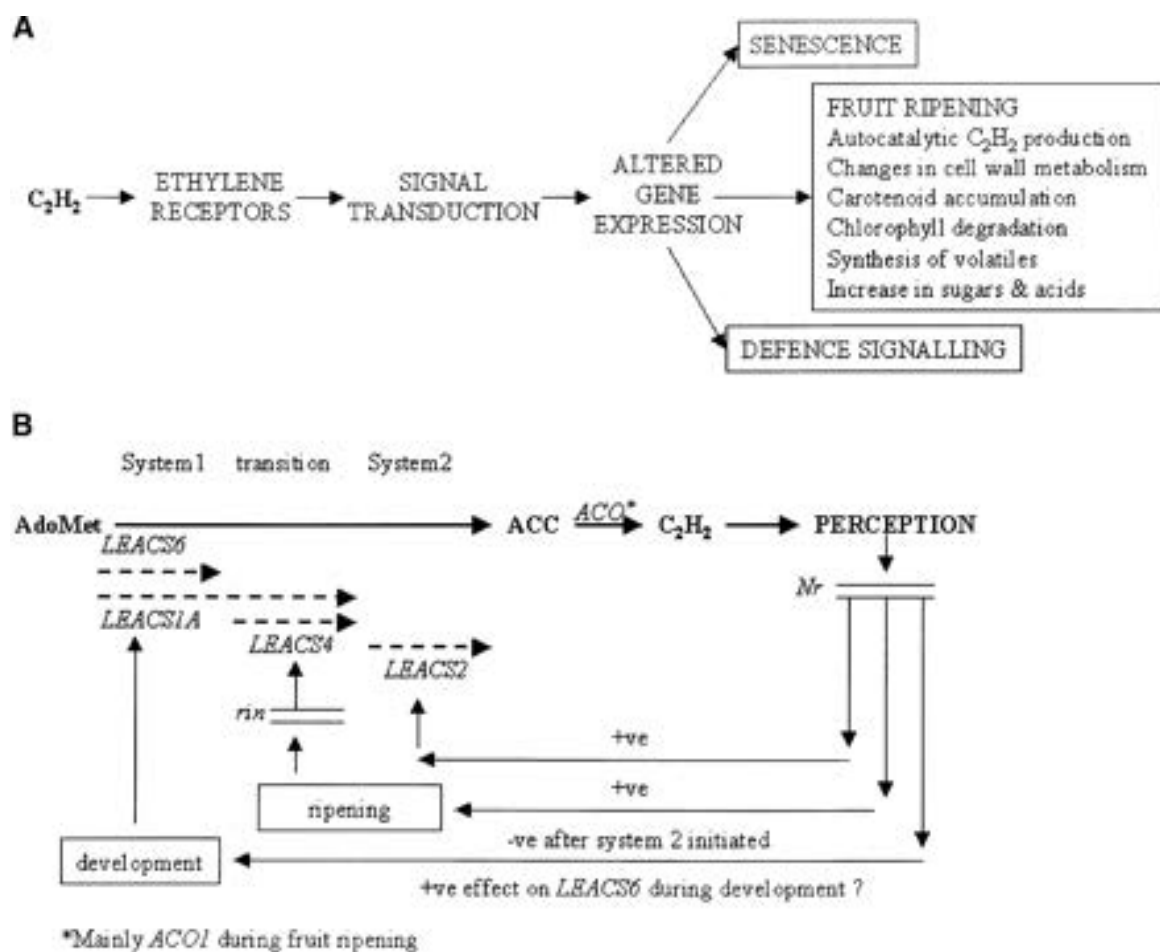


Fig. 2: (A) Rappresentazione schematica del ruolo che l'etilene ha durante la maturazione del pomodoro; (B) Modello per spiegare la differente regolazione dell'espressione genica dell'ACS durante la transizione dal sistema 1 al sistema 2 per la sintesi d'etilene nel pomodoro. I simboli $\pm$ ve (negative) and +ve (positive) si riferiscono all'azione dell'etilene sulle vie biochimiche che reprimono (-ve) o stimolano (+ve) l'espressione genica dell'ACS. [6]

Studi sul recettore dell'etilene non ne hanno ancora chiarito l'attività: è indicata come una proteina chinasi, ma ciò non è ancora provato definitivamente. In qualche modo, tuttavia, il recettore sopprime la trasduzione del segnale in assenza di etilene. Quando l'etilene si lega, viene tolto il blocco alla trasduzione del segnale e viene lanciato un segnale chimico alle cellule che permette la cascata di reazioni [7,8].

Riportiamo una rappresentazione schematica dell'azione dell'etilene sul recettore in Fig. 3a e della cascata di reazioni successive in Fig. 3b; in particolare il legame tra etilene e il suo recettore avvia la produzione endogena di altro etilene e la respirazione climaterica.

L'etilene svolge quindi un ruolo fondamentale nella maturazione, nonostante la sua estrema semplicità strutturale, essendo una molecola gassosa costituita da due atomi di Carbonio legati con legame sigma e π greco e quattro di Idrogeno ($H_2C=CH_2$). Il precursore dell'etilene è una forma attivata dell'amminoacido metionina, la S-adesilmetionina. Un passaggio successivo porta alla formazione dell'acido 1-carbossil-1-amminociclopropano, con liberazione di un gruppo tiometilico legato all'adenosina. Per azione dell'ossigeno si ha la formazione di etilene e liberazione di ammoniaca ed anidride carbonica.

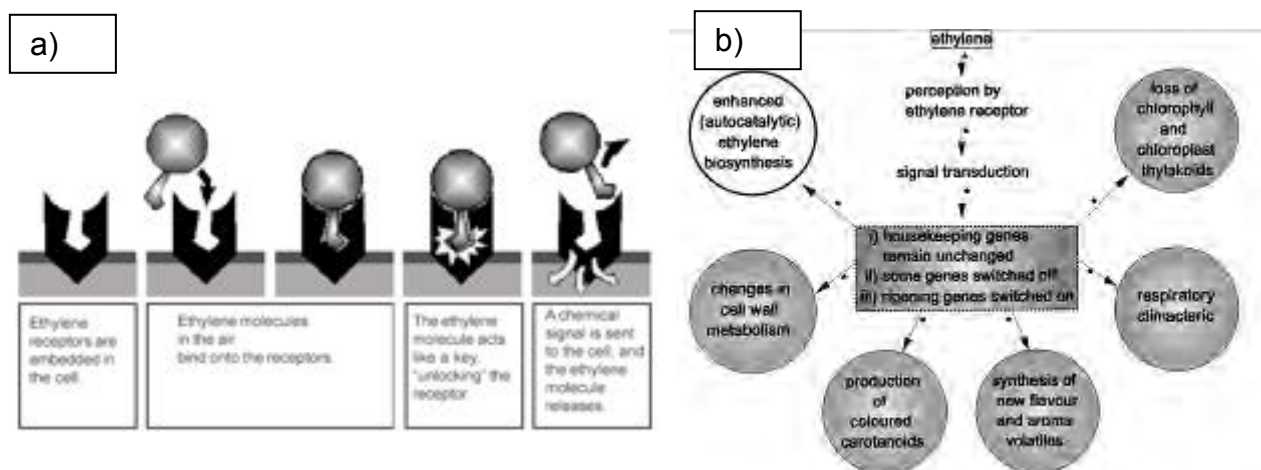


Fig. 3: a) Rappresentazione schematica del recettore dell'etilene: il legame dell'etilene con il recettore "sblocca" il recettore e viene lanciato un segnale chimico alle cellule che permette la cascata di reazioni; b) cascata di reazioni innescate dall'etilene. [9]

Dei frutti e dei vegetali raccolti annualmente ed avviati alla commercializzazione una percentuale significativa viene perduta a causa della prematura senescenza o per diversi tipi di alterazioni, ed il ruolo prominente dell'etilene nel controllo delle maturazione e nella senescenza dei frutti è stato documentato da tempo. Uno dei primi cambiamenti biochimici percepibili che avvengono in un frutto all'inizio del ripenio è un rapido incremento nella biosintesi di etilene [10].

Lo stadio di ripenio del frutto è caratterizzato da cambiamenti chimico-fisici accelerati ed innescati, a partire dalla raccolta, che determinano la qualità commerciale. In questa fase il frutto va incontro a modificazioni strutturali ed organolettiche che lo condurranno a raggiungere aroma e gusto ottimali. In particolare si osservano mutamenti del colore, della consistenza, aumento degli zuccheri, comparsa di profilo aromatico. La frutta climaterica (pere, mele, banane, mango etc) va incontro ad un incremento dell'attività respiratoria e della produzione di etilene. Nei frutti non climaterici (uva, ciliegie, agrumi, fragole), invece sia la respirazione che la produzione di etilene rimangono a livelli piuttosto bassi. L'aumento nella produzione di etilene nella frutta climaterica induce la trascrizione di geni che codificano per le proteine responsabili dei cambiamenti associati al ripenio dei frutti.

Al fine di bloccare le azioni dannose dell'etilene è possibile seguire due strade principali: saturare i recettori a livello cellulare o provvedere alla rimozione dell'etilene dall'ambiente di stoccaggio o dalla confezione. La manipolazione della sensibilità all'etilene attraverso l'uso di inibitori non tossici può influenzare decisamente la shelf-life di frutti, vegetali e piante ornamentali.

1.2 Assorbitori ed Inibitori dell'etilene

La senescenza e la perdita qualitativa dei prodotti ortofrutticoli può essere rallentata sfruttando l'azione di assorbitori di etilene che sequestrano questo ormone che si accumula nelle confezioni ed è responsabile della sovra maturazione della frutta climaterica. Per quel che concerne gli assorbitori i più utilizzati sono sali di permanganato su supporti granulari di allumina.

E' anche possibile inserire negli imballaggi degli inibitori di etilene, che in generale si suddividono in due classi, quelli non competitivi e quelli competitivi. I non competitivi bloccano l'azione dell'etilene semplicemente rallentando il metabolismo cellulare. La seconda classe di inibitori include molecole che si combinano con i recettori dell'etilene e così prevengono le risposte da esso indotte. Tuttavia nessuno degli inibitori competitivi è privo di effetti aspecifici di rallentamento del metabolismo.

Per la CO_2 è ancora dibattuto se sia o no un inibitore competitivo. Da tempo è noto che essa riduce gli effetti etilene-indotti su mele e banane e previene l'abscissione e la senescenza florale. La somiglianza strutturale tra gli analoghi dell'etilene e la CO_2 suggerisce che essa inibisca competitivamente l'etilene. Composti come il monossido di carbonio ($\text{C}=\text{O}$) l'allene ($\text{CH}_2=\text{C}=\text{CH}_2$) e la stessa anidride carbonica ($\text{O}=\text{C}=\text{O}$) sono accomunati dall'avere un orientamento analogo dei doppi legami con carbonio centrale ibridizzato sp nell'allene e nell'anidride carbonica, che genera molecole lineari. Tuttavia alcune osservazioni suggeriscono che questa interpretazione non è corretta. Ad esempio si sa che l'anidride carbonica non blocca il recettore dell'etilene in piante di riso, al contrario del norbornadiene [11].

Sulla base delle ricerche sviluppate dal gruppo del Dipartimento di Chimica dell'Università "Sapienza", tra i materiali che presentano una buona prospettiva in questo ambito sono annoverati complessi e polimeri organometallici, in grado di interagire con l'etilene e di assorbirlo.

Tra i possibili sistemi organometallici, verrà posta attenzione a complessi quadrato planari del Pt(II) e del Pd(II) con leganti organici a coniugazione π , modelli di polimeri ed oligomeri a delocalizzazione elettronica modulabile. Questi materiali sono stati preparati e caratterizzati nell'ultimo decennio [12, 13]. L'opportuna combinazione tra sistema polimerico e natura del metallo può portare ad una modulazione fine delle proprietà chimico-fisiche (conducibilità elettrica, risposta in sensori di gas) del materiale [14].

Questi materiali possono essere preparati con strutture micro o nanometriche. La morfologia superficiale è di fondamentale rilevanza per le applicazioni di membrane polimeriche nella sensoristica [15, 16].

L'idea progettuale sulla base di queste premesse è quella di sviluppare uno strato assorbente e selettivo per l'etilene, basato proprio su complessi e polimeri organometallici, sia testando la risposta inizialmente su sistemi amorfi e in seguito, individuati i più efficienti, renderli nanostrutturati al fine di incrementare l'area superficiale e conseguentemente la capacità di assorbimento.

1.3 La maturazione post-raccolta della banana

La green life (letteralmente "vita verde") del frutto rappresenta il tempo che intercorre tra la raccolta del frutto maturo e l'inizio del climaterio respiratorio, in altre parole la fase pre-climaterica subito dopo la raccolta [17]. Una banana ad un determinato stadio di maturazione ha una green life potenziale: ogni trattamento o situazione ambientale che possa costituire causa di stress per il frutto, può portare ad una riduzione della green life o all'immediato instaurarsi della fase climaterica.

Con il proseguire dello sviluppo del frutto (misurato come numero di giorni dall'antesi o dall'emergenze del casco) esso diventa sempre più 'maturo'. La maturità alla raccolta è l'età fisiologica del frutto al momento della raccolta commerciale e racchiude i requisiti per la maturità fisiologica: in altre parole, al momento della raccolta il frutto deve aver raggiunto uno stadio di sviluppo tale che possa poi sviluppare caratteristiche di edibilità accettabili. Inoltre, altre considerazioni di ordine commerciale possono portare a dei compromessi tra maturità alla raccolta e, ad esempio, determinate richieste del mercato in termini di standard di qualità quali pezzatura e colore del frutto o la necessità di garantire una green life più lunga per raggiungere mercati più lontani [18].

Col proseguire della maturazione il frutto aumenta in peso ma diminuisce la green life. Per ogni settimana di anticipo rispetto alla maturità commerciale, la green life aumenta di 3-5 giorni, ma il peso del casco diminuisce di circa il 10% [19]. Una maturità ottimale permetterà al frutto di raggiungere una buona pezzatura e gradevoli caratteristiche organolettiche garantendo al tempo stesso una green life sufficientemente lunga tale da permetterne la commercializzazione nel mercato prescelto [20].

Il termine della green life è segnato dall'inizio della fase di ripening, fase climaterica o di ripenio. Durante questa fase nella banana avviene una sequenza di cambiamenti quali il viraggio del colore della buccia dal verde al giallo e i cambiamenti nel gusto, nell'aroma e nella consistenza della polpa, dovuti alla conversione dell'amido in zuccheri; a questi fenomeni si aggiunge la perdita di consistenza legata ai cambiamenti nella parete cellulare e, col proseguire della fase climaterica, si assiste all'evoluzione delle sostanze volatili [21].

Mostriamo in Fig. 4 la sequenza dei cambiamenti con conseguente formazione di zuccheri ed anidride carbonica che avvengono durante il ripening della banana.

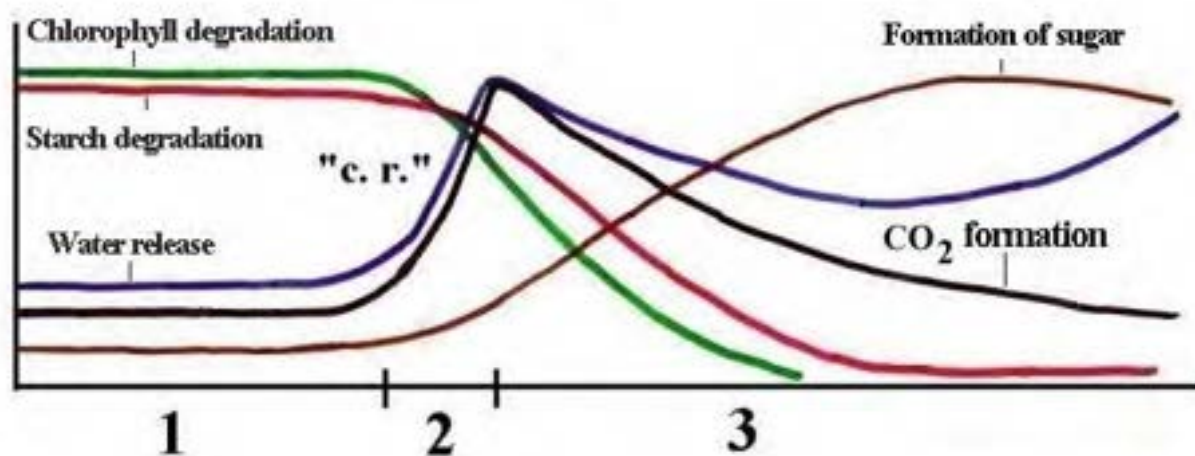


Fig. 4. Sequenza dei cambiamenti che avvengono durante il ripening della banana. 1, fase preclimaterica (colorazione verde); 2, fase climaterica (viraggio del colore dal verde al giallo); 3, fase postclimaterica (colorazione gialla). "c. r.", climateric rise = picco climaterico [9]

Nei frutti climaterici, tra i quali banane, si assiste ad un pronunciato aumento della respirazione in corrispondenza della fase di ripenio e per questo sono detti climaterici. In questi frutti, la fase di ripenio viene rapidamente indotta quando la quantità di etilene presente eguaglia o supera un determinata soglia in termini di concentrazione e di tempo di esposizione.

Peacock affermava che qualsiasi livello di etilene porta ad una diminuzione della green life, e l'efficacia varia in funzione del logaritmo della concentrazione e del tempo di esposizione. Inoltre, brevi periodi di esposizione all'etilene possono non indurre immediatamente il ripenio, ma rendere i tessuti più sensibili all'etilene [22].

La concentrazione endogena di etilene è generalmente molto più elevata di quella esterna prima che il climaterio respiratorio abbia inizio. Per Peacock, il concetto secondo il quale l'etilene endogeno stimolerebbe l'inizio del ripenio solo una volta superata una certa soglia risultava inadeguato e concluse che l'etilene endogeno è fisiologicamente attivo durante tutto il corso della green life.

Esistono, quindi, due approcci per gestire la green life: modificare la quantità di etilene presente o ridurre la sensibilità del frutto all'etilene.

Riguardo alla fase climaterica, l'etilene prodotto durante questo periodo può, come precedentemente riportato, mediare i cambiamenti associati al ripenio, quali ad esempio il cambiamento di colore e la perdita di consistenza.

In riferimento al viraggio del colore, viene definita shelf-life il tempo che impiega il frutto di banana (espresso in “giorni di shelf-life”) per passare dallo stadio di colore 4 (verde) allo stadio di colore 7 (giallo intenso) come mostrato in Fig. 5 [23].



Fig. 5. Sequenza del viraggio degli stadi di colore per la banana al trascorrere del tempo [23]

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 Materiali e metodi

Materiali e metodi relativi alla sperimentazione condotta presso il Laboratorio NANOMATERIALI, responsabile Prof. Maria Vittoria Russo del Dipartimento di Chimica dell'Università Sapienza di Roma.

Il primo obiettivo è la preparazione e caratterizzazione di nuovi materiali da testare come assorbitori di etilene. Per le procedure sintetiche, i materiali sono stati preparati secondo metodologie recentemente messe a punto e pubblicate dal gruppo di ricerca [12-15, 24, 25]. La fase di purificazione dei materiali è stata seguita con particolare attenzione per la particolare applicazione in campo alimentare. Tutti i materiali sono stati caratterizzati mediante spettroscopia FTIR, UV-vis ed NMR ed hanno mostrato tutti i segnali caratteristici.

Una volta preparati, questi materiali sono stati depositati, sotto forma di film, su substrati inerti (in vetro, preventivamente lavato mediante immersione in solventi quali acetone, cloroformio, etanolo) ricoperti per casting di circa 2 mg di sostanza, sviluppando un'area sensibile di 1 cm^2 , e testati come assorbitori di etilene.

Sono stati realizzati degli ambienti (in vetro pirex, capacità 1 L) in cui la frutta climaterica, nel nostro caso banane, potesse sviluppare l'etilene e sono stati posti nelle vicinanze i film dei vari materiali sopra citati, per valutare e confrontare la loro capacità di assorbimento dell'etilene, direttamente nel corso della maturazione della frutta. Le prove sono state condotte a temperatura ed umidità ambiente.

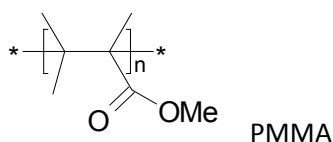
Lo studio si è articolato in due fasi:

Fase I Diversi materiali potenzialmente assorbitori, sulla base di studi di letteratura, sono stati selezionati, preparati e testati tramite valutazioni qualitative come assorbitori di etilene.

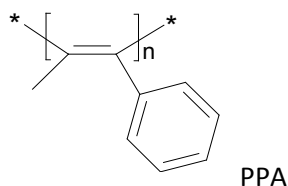
Fase II Sulla base dei test preliminari condotti nella fase I, sono stati selezionati alcuni materiali. In questo caso la loro capacità di assorbitori di etilene è stata confrontata e valutata seguendo la variazione di colorazione della buccia del frutto, tramite rilevamenti colorimetrici. Gli studi sono stati condotti in triplo ed i risultati confrontati con un frutto di controllo.

I materiali utilizzati nella **Fase I** (valutazioni qualitative della maturazione di banane) sono stati:

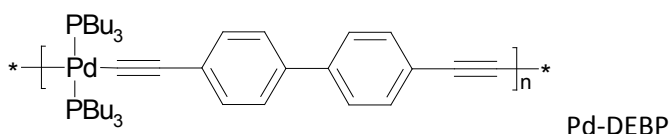
a) polimetilmetacrilato nanostrutturato (PMMA, nanosfere di diametro 300 nm, depositate da H₂O sospensione di concentrazione 1 mg/mL)



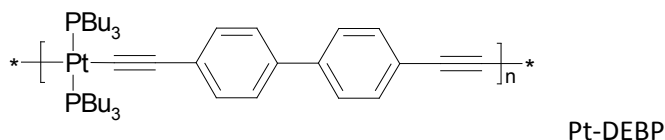
b) polifenilacetilene (PPA, amorfo depositato da CHCl₃ soluzione 1 mg/mL)



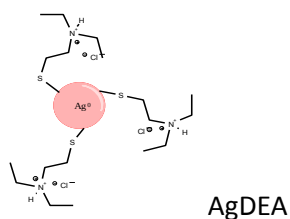
c) polimetallaino contenente Pd(II) (Pd-DEBP, amorfo, depositato da CHCl₃, soluzione 1 mg/mL)



d) polimetallaino contenente Pt(II) (Pt-DEBP, amorfo, depositato da CHCl₃, soluzione 1 mg/mL)



e) nanoparticelle d'Ag funzionalizzate con tiolo idrofilico DEA (AgDEA)



f) complesso quadrato planare *trans*-Pd(PBu₃)₂Cl₂ in PPA (2 mg complesso in 2 mg di polimero, disciolti in 2 mL CHCl₃)

Di questi materiali, alcuni promettenti sono stati selezionati per la **Fase II** (rilevamenti colorimetrici sui frutti, in triplo, per valutare la maturazione di banane) confrontandoli con complessi di Pt(II) e Co(II). In particolare si riportano i risultati per i seguenti materiali:

Pd-DEBP, Pt-DEBP, $[\text{Pd}(\text{PBU}_3)_2\text{Cl}_2]$ in PPA, CoCl_2 in PPA.

Sia per la sperimentazione nella Fase I che nella Fase II sono stati utilizzati frutti commerciali (banane) prelevati da un mercato rionale (Roma) e trasportati nei nostri laboratori avendo cura di evitare una eccessiva manipolazione che potesse indurre deperimento dei frutti. Questi frutti (come la quasi totalità delle banane importate in Europa) provengono dalle piantagioni dell'area Centro-Americana (Costarica, Ecuador). I frutti sono stati conservati separatamente e lasciati maturare naturalmente in presenza dei diversi materiali, al buio, a temperatura ed umidità ambiente, in appositi contenitori in vetro pirex chiusi. Si è mantenuto un CONTROLLO nelle medesime condizioni, ma privo di materiale assorbitore come riferimento.

Per ogni materiale da testare nella Fase II sono state utilizzate 2 banane. L'analisi colorimetrica della buccia è stata eseguita periodicamente, durante un periodo di 22 giorni, tramite un colorimetro Minolta CM-2600d (Minolta CO., LTD, Japan), posizionando il sensore in prossimità di tre zone del frutto (apice, zona equatoriale e finale) e ricavando poi una media ed una deviazione standard. I risultati sono stati espressi attraverso le abbreviazioni del sistema CIELAB (L^* , a^* , b^*) e riportando i valori come a^* , b^* , (a^*b^*) e come H° (Hue angle).

2.2 Risultati e discussione

2.2.1 Fase I

Dopo un'accurata revisione della letteratura nella prima fase sono stati selezionati alcuni materiali assorbitori e testati qualitativamente sui frutti. In questi esperimenti le banane commerciali erano già state indotte al ripenio e di conseguenza, la produzione di etilene endogeno ed i processi di ripening erano già fase di svolgimento sia nei campioni del controllo (bianco) che in quelli in presenza dei materiali assorbitori.

Mostriamo in Fig.6. le immagini fotografiche di alcuni frutti posti nei contenitori in presenza dei film di diversi materiali sotto analisi, all'inizio di un esperimento (a) e dopo 10 giorni (b).

a) Immagini fotografiche all'inizio dell'esperimento



b) Immagini fotografiche dopo 10 giorni dei frutti mantenuti in presenza dei film dei materiali selezionati

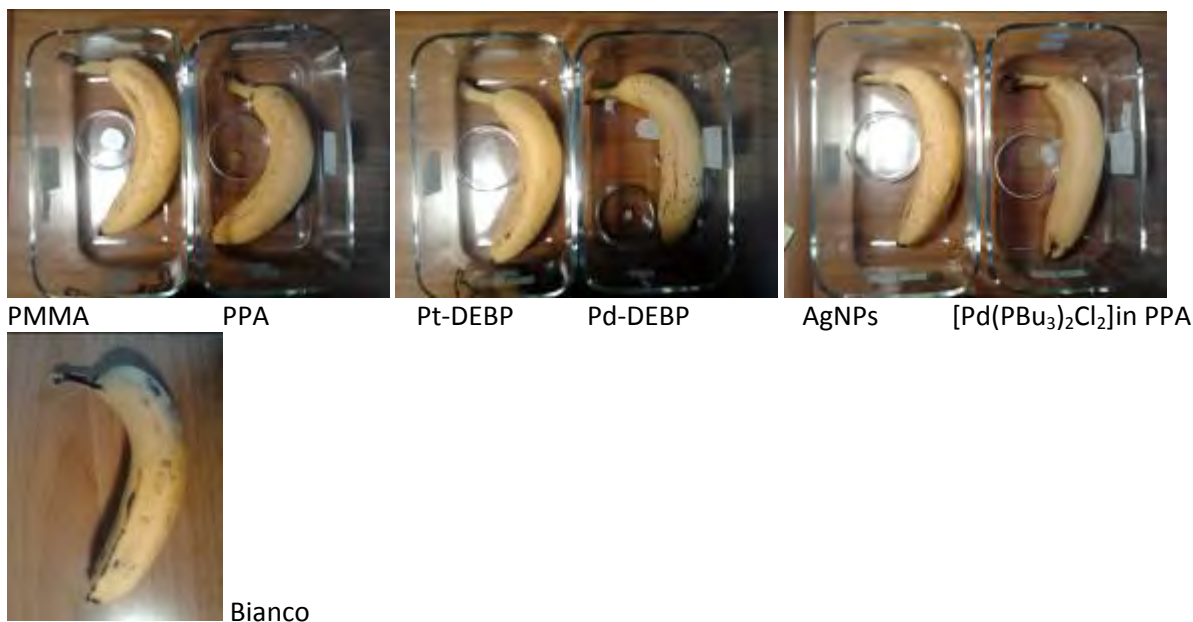


Fig.6. Immagini fotografiche di frutti di un esperimento conservati a temperatura ambiente con diversi materiali (a) all'inizio dell'esperimento e (b) tempo 10 giorni.

Confrontando con il bianco, in questo gruppo di campioni sembra che i frutti mantenuti in presenza dei vari materiali abbiano migliore aspetto. In particolare, si dispongono in ordine di maturazione i vari campioni (dal frutto più maturo al meno maturo): bianco $\geq$ PMMA > AgNPs > PPA $\approx$ Pd-DEBP > Pt-DEBP > Pd(PBu₃)₂Cl₂ in PPA.

Inoltre la consistenza dei frutti mantenuti in presenza di PPA $\approx$ Pd-DEBP > Pt-DEBP > Pd(PBu₃)₂Cl₂ in PPA è più solida rispetto al bianco.

Sembra che rispetto al bianco ci sia un effetto di inibizione del processo di maturazione da parte di **Pd(PBu₃)₂Cl₂ in PPA > Pt-DEBP**, che vengono selezionati per ulteriori test di confronto. Inoltre verranno testati anche complessi del Co(II), Pt(II) e Pd(II).

La prima fase quindi si realizza in uno studio qualitativo tramite valutazione di immagini fotografiche dei frutti nel tempo, comparando il CONTROLLO con i rutti conservati in presenza di assorbitori.

Il fine era quello di riuscire a selezionare un ristretto numero di materiali che fungessero da assorbitori e su cui condurre studi più approfonditi nella Fase II, con l'ausilio del colorimetro.

2.2.2 Fase II

Nella seconda fase è stato studiato l'effetto dei materiali assorbitori selezionati sulla maturazione dei frutti, mediante rilevamenti colorimetrici della buccia.

Anche in questi esperimento le banane erano già state indotte al ripenio e di conseguenza, la produzione di etilene endogeno ed i processi di ripening erano già fase di svolgimento sia nei campioni del controllo (bianco) che in quelli in presenza dei materiali assorbitori. Si è scelto di effettuare l'analisi in doppio (su due frutti mantenuti nelle medesime condizione) per avere dati anche sulla riproducibilità.

I materiali studiati nella fase II sono film di Pt-DEBP, Pd-DEBP, CoCl₂ in PPA, PdCl₂(PBu₃)₂ in PPA .

Gli studi sono stati effettuati nell'arco di 22 giorni e i risultati dei rilievi colorimetrici sulla buccia sono stati riportati come **a***, **b***, (**a*b***) e come **H°** (Hue angle).

Per quanto concerne il parametro **a*** riportiamo in Fig. 6 l'andamento dei valori nel periodo in esame.

In questo caso è evidente l'effetto esercitato dai materiali a base di Pd (II), Pt (II) e Co(II) sull'evoluzione del colore: le banane mantenute in presenza di detti materiali, infatti, pur presentando nei primi 3 giorni di conservazione a temperatura ambiente, valori di "a*" (comparsa del giallo) simili ai frutti del controllo, completavano il viraggio di colore con 4 giorni di ritardo (Fig. 6).

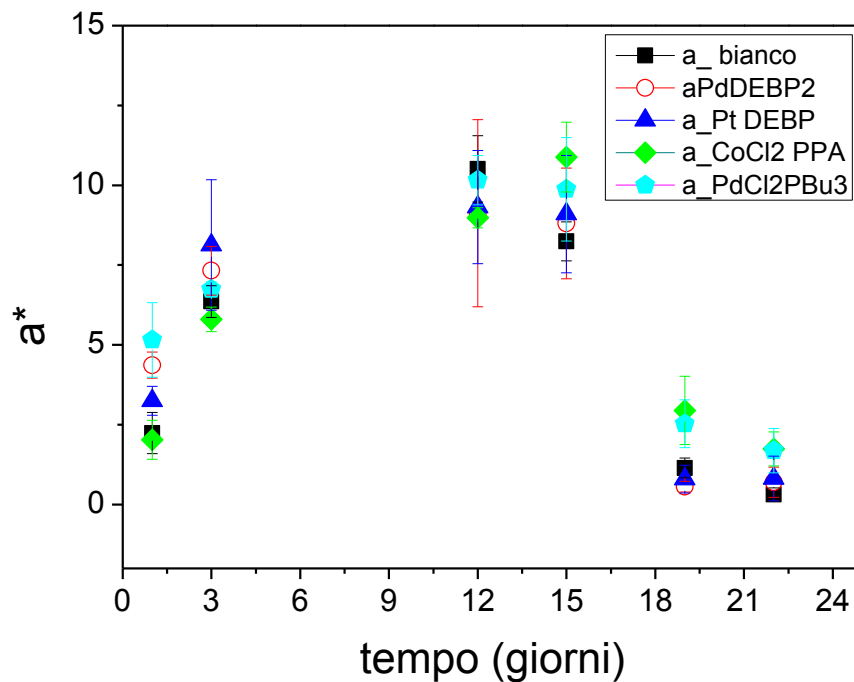


Fig. 6. Variazione nel tempo del colore della buccia dei frutti, espresso in termini di a^* per il CONTROLLO (■ bianco) e le banane in presenza dai vari assorbitori (● Pd-DEBP; ▲ Pt-DEBP; ◆ CoCl_2 in PPA, ◆ $\text{PdCl}_2(\text{PBU}_3)_2$ in PPA). I frutti erano conservati a temperatura ambiente. I simboli indicano il valor medio e le barre la relativa deviazione standard su misure colorimetriche effettuate in 3 diversi punti dello stesso frutto.

L'azione "assorbente" esercitata dai materiali giustifica il rallentato sviluppo del colore nelle banane. In questi frutti, quindi, la percezione dell'ormone risultava diminuita dall'assorbimento da parte dei materiali mentre i frutti del controllo, continuavano la normale evoluzione del colore.

Questo spiega anche l'andamento dei valori di b^* riportato in Fig. 7, dove al 15° giorno i frutti in presenza di assorbitori a base di Pd(II), Pt(II) e Co (II) mostrano valori di b^* maggiori del controllo, ancora più evidenti nei giorni successivi.

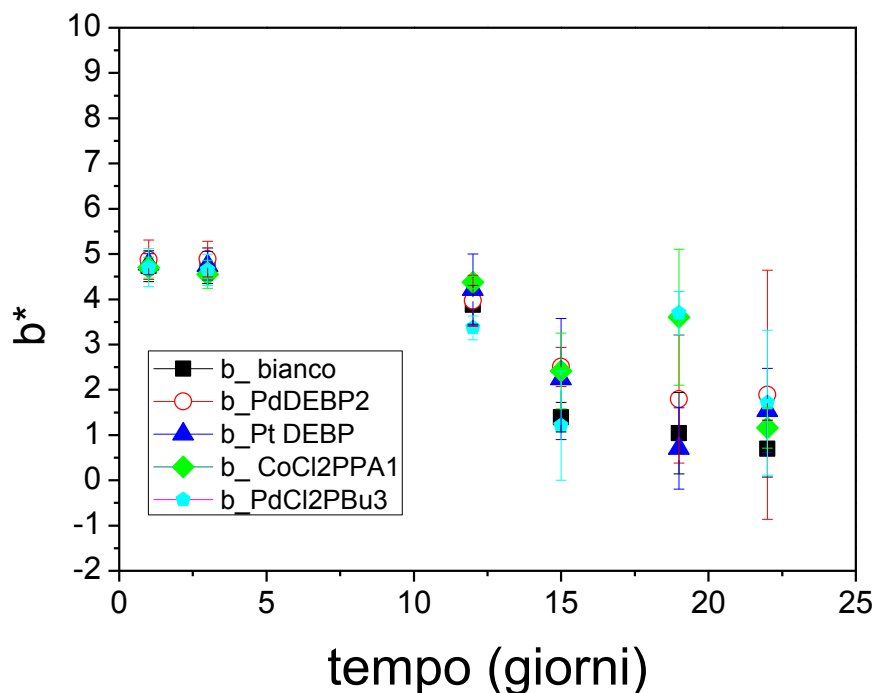


Fig. 7 Variazione nel tempo del colore della buccia dei frutti, espresso in termini di b^* per il CONTROLLO (■ bianco) e le banane in presenza dai vari assorbitori (● Pd-DEBP; ▲ Pt-DEBP; ◆ CoCl_2 in PPA, ◆ $\text{PdCl}_2(\text{PBu}_3)_2$ in PPA). I frutti erano conservati a temperatura ambiente. I simboli indicano il valor medio e le barre la relativa deviazione standard su misure colorimetriche effettuate in 3 diversi punti dello stesso frutto.

Un altro modo di evidenziare nel periodo in esame andamenti diversi per i frutti del CONTROLLO e dei frutti in presenza di assorbitori è riportato in Fig.8 a-e che mostra l'andamento nei 22 giorni dei parametri a^* e b^* ovvero si considera il piano (a^*b^*).

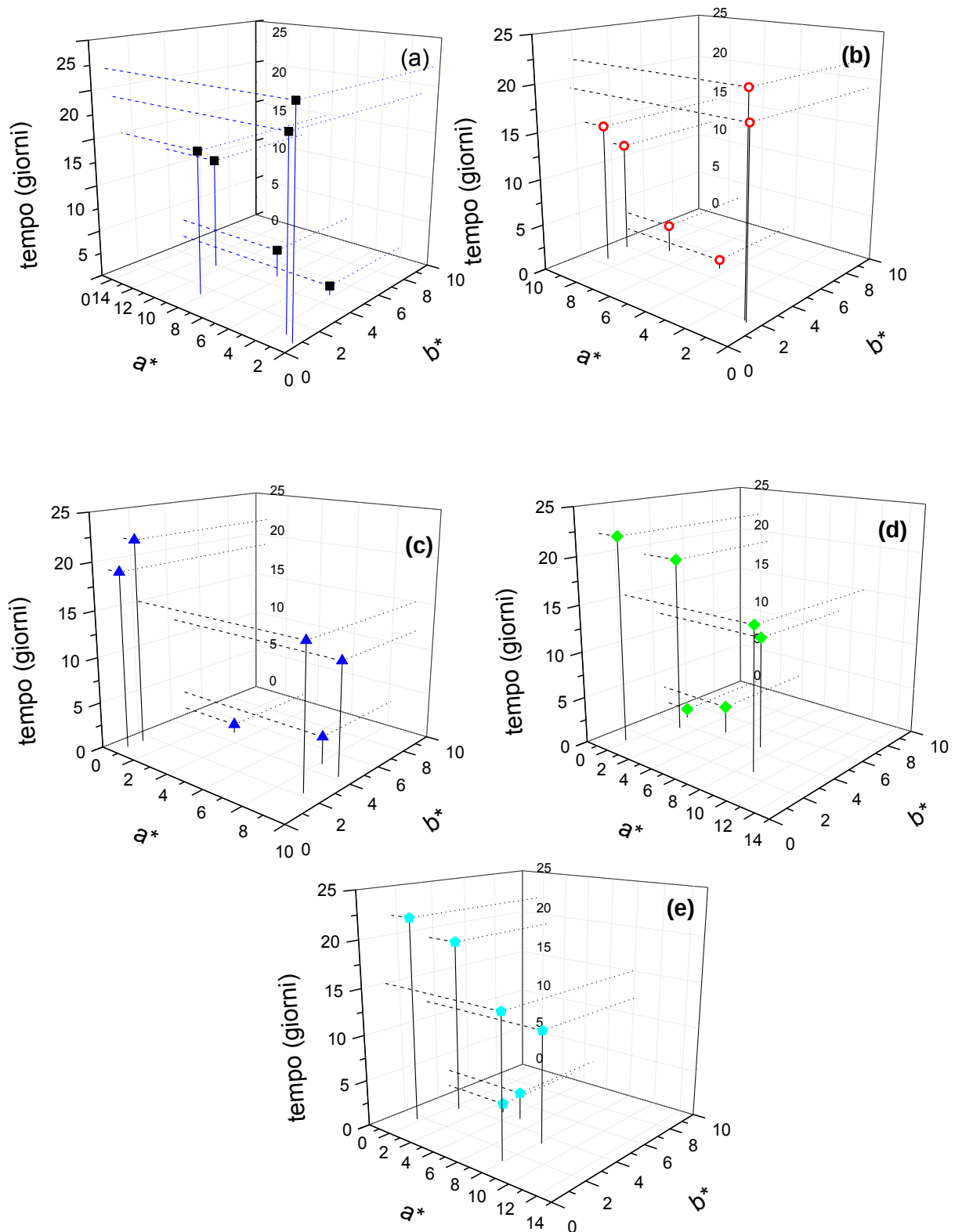


Fig. 8 Variazione nel tempo del colore della buccia dei frutti, espresso in termini di (a^*b^*) per le banane in presenza dai vari assorbitori: (a) ■ il CONTROLLO o bianco ; (b) ● Pd-DEBP; ▲ Pt-DEBP; ◆ CoCl₂ in PPA; ◆ PdCl₂(PBu₃)₂ in PPA. I frutti erano conservati a temperatura ambiente. I simboli indicano il valor medio di misure colorimetriche effettuate in 3 diversi punti dello stesso frutto; le linee indicano le proiezioni sugli assi.

Mostriamo in Fig. 9 a-b-c le immagini fotografiche di alcuni frutti all'inizio dell'esperimento (a), dopo 12 giorni (b, dopo 15 giorni (c) e dopo 22 giorni (d). Il campione di controllo è stato confrontato con campioni di banane poste in presenza dei vari materiali, ogni prova eseguita in doppio.

a) Inizio dell'esperimento:



bianco

Pd-DEBP

Pt-DEBP



CoCl_2 in PPA

$\text{PdCl}_2(\text{PBu}_3)_2$ in PPA

b) tempo 12 giorni:



bianco

Pd-DEBP

Pt-DEBP



CoCl_2 in PPA

$\text{PdCl}_2(\text{PBu}_3)_2$ in PPA

c) tempo 15 giorni:



bianco

Pd-DEBP

Pt-DEBP



CoCl_2 in PPA

$\text{PdCl}_2(\text{PBu}_3)_2$ in PPA

d) tempo 22 giorni:



bianco

Pd-DEBP

Pt-DEBP



CoCl_2 in PPA

$\text{PdCl}_2(\text{PBu}_3)_2$ in PPA

Fig. 9.a) Immagini fotografiche di alcuni frutti all'inizio dell'esperimento; b) dopo 12 giorni; c) dopo 15 giorni e (d) dopo 22 giorni.

I campioni mantenuti in presenza dei film a base di polimeri organometallici sembrano aver subito un rallentamento nella maturazione, sebbene sui vari frutti vi siano delle macchie scure causate da urti e sollecitazioni meccaniche pregresse, che compromettono l'aspetto di alcuni campioni. Nei campioni mantenuti a 15 giorni si osservano evidenti segni di invecchiamento, macchie nei punti in cui il frutto ha subito pressioni e muffe nelle zone a maggior deterioramento. Confrontando il bianco con i frutti mantenuti in presenza dei film di materiali assorbitori, si evidenzia un miglior mantenimento dei frutti mantenuti in presenza dei film di Pd-DEBP e Pt-DEBP posti a sinistra, indicati con la freccia rossa, sebbene vi siano muffe sui frutti di controllo posti a destra, causate da urti e pressioni. Passando a 22 giorni, il frutto mantenuto in presenza di Pd-DEBP, pur invecchiato, mostra meno evidenti segni di deterioramento. La consistenza dei frutti è variata rispetto all'inizio delle prove e tutti si presentano morbidi al tatto.

Valutando le prove si conferma l'effetto promettente dei film a base di polimeri organometallici (Pd-DEBP e Pt-DEBP).

Degno di nota il fatto che i frutti mantenuti in presenza di assorbitori a base di $\text{PdCl}_2(\text{PBU}_3)_2$ e CoCl_2 al termine della loro conservazione presentavano consistenza qualitativamente molto simili a quelli del controllo non trattato al 12° giorno, sebbene dalle immagini fotografiche risulta evidente il deterioramento.

Ulteriori conferme vengono dall'analisi della variazione di H° (Hue angle) degli stessi frutti, riportata in Fig.10.

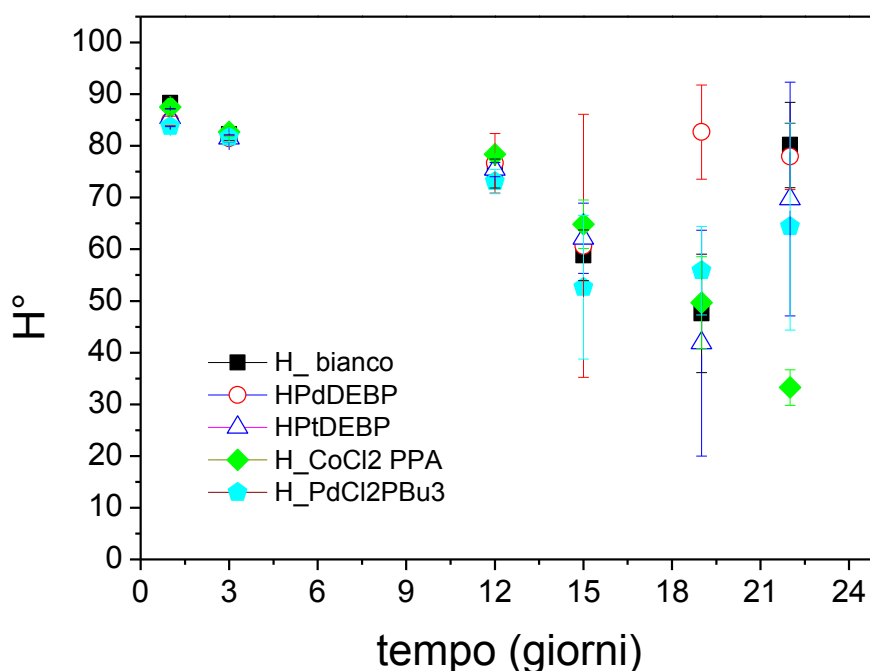


Fig. 10. Variazione nel tempo del colore della buccia dei frutti, espresso in termini di H° per il CONTROLLO (■ bianco) e le banane in presenza dai vari assorbitori (● Pd-DEBP; ▲ Pt-DEBP; ◆ CoCl_2 in PPA, ◆ $\text{PdCl}_2(\text{PBU}_3)_2$ in PPA). I frutti erano conservati a temperatura ambiente. I simboli indicano il valor medio e le barre la relativa deviazione standard su misure colorimetriche effettuate in 3 diversi punti dello stesso frutto.

Una diminuzione del valore di Hue angle (H°) è associata con il passaggio del colore della buccia dal giallo al marrone. Dopo 12 giorni di i frutti conservati con l'assorbitore a base di Pd (II) mostravano una decisa

colorazione gialla mentre gli altri campioni, tra cui il bianco, tendevano al giallo intenso con punteggiatura nera (black spotting). In particolare dopo 15 giorni l'effetto degli assorbitori si differenziava: le banane in presenza di $\text{PdCl}_2(\text{PBU}_3)_2$ in PPA mostravano un minor decremento nei valori di H° rispetto al controllo e agli altri materiali testati.

3 Conclusioni

Nel corso delle nostre sperimentazioni si sono svolte ricerche tese a valutare l'efficacia di nuovi materiali assorbitori di etilene nel prolungare la shelf life delle banane e rallentarne la maturazione.

In particolare, nelle condizioni testate nel nostro laboratorio, a temperatura ed umidità ambientali, i dati hanno mostrato che:

- fase I: l'utilizzo di materiali contenenti Pd (II) e Pt (II) erano sufficienti a provocare un incremento della shelf life dei frutti in termini di ritardata evoluzione del colore della buccia e di mantenimento della consistenza della polpa.
- fase II: l'utilizzo di materiali contenenti Pd (II) e Pt (II) e Co(II), valutato tramite rilevamenti colorimetrici sulla buccia dei frutti, ha indicato un sostanziale assorbimento di etilene che si concretizza in una più lenta maturazione dei frutti, fino a 15 giorni rispetto al CONTROLLO.

Bisogna però tener conto che, nel caso delle banane, fattori quali lo stadio di maturazione, l'umidità, la temperatura, la precedente esposizione all'etilene o condizioni di crescita, potrebbero influenzare decisamente i risultati.

Interessanti prospettive di studi futuri potrebbero perciò essere individuati nell'attuare i seguenti studi:

- Studi relativi all'effetto dell'umidità relativa e della temperatura dell'ambiente di conservazione sull'evoluzione della maturazione dei frutti (variazione del colore della buccia) in seguito alla presenza di assorbitori di etilene a base di Pd (II) e Pt (II)
- Verifica di una diversa/maggiore efficacia degli assorbitori sui frutti più immaturi (i.e. minore arco di tempo tra fioritura e raccolta dei frutti stessi)
- Studio dell'effetto della concentrazione dei film, variando la concentrazione ad esempio dei complessi nella matrice polimerica o utilizzando soluzioni a differente concentrazione per i polimeri organometallici.
- Utilizzo di materiali assorbitori nanostrutturati per incrementare la superficie di interazione con l'etilene.

In conclusione, abbiamo effettivamente verificato la capacità di pochi milligrammi dei nostri materiali, in particolare dei polimeri organometallici Pt-DEBP ed in misura maggiore Pd-DEBP nel ritardare la maturazione delle banane, ponendo un serio presupposto riguardo ad una sicura ed affidabile applicazione di questi assorbitori dell'azione etilenica.

4 Riferimenti bibliografici

1. B. Esser, J.M. Schnorr, T.M. Swager, Selective detection of ethylene gas using carbon nanotube-based devices: utility in determination of fruit ripeness, *Angewandte Chem. Int. Ed.* 51 (2012) 5752-5756
2. L. A. Terry, T. Ilkenhans, S. Poulston, L. Rowsell, A.W. Smith, J. Development of New Palladium-Promoted Ethylene Scavenger Postharvest *Biol. Technol.* 45 (2007) 214
3. R.B.H. Wills, W.B. Mc Glasson, D. Graham, D.C. Joyce, *Postharvest: An Introduction to the Physiology and Handling of Fruit, Vegetables and Ornamentals* (4th ed.). (1998) Sydney: UNSW Press Ltd.
4. Thompson, Seymour, Comparative effects of acetylene and ethylene gas on initiation of banana ripening. *Ann. Appl. Biol.* 101 (1982) 407-410.
5. A.K. Mattoo, J.C. Suttle, *The Plant Hormone Ethylene*, CRC Publ. Inc., (1991) Boca Raton, Florida.
6. L. Alexander, D. Grierson, Ethylene biosynthesis and action in tomato: a model for climacteric fruit ripening. *Journal of Experimental Botany* 53 (2002), 2039-2055
7. H.J. Klee, Control of ethylene-mediated processes in tomato at the level of receptors. *Journal of Experimental Botany*, 53 (2002), 2057-2063.
8. H. Klee, D. Tieman, The tomato ethylene receptor gene family: Form and function. *Physiologia Plantarum* 115 (2002) 336-341.
9. G. De Martino *Controllo della maturazione post-raccolta della banana (Musa sp.) attraverso l'inibizione della percezione dell'etilene: effetto dell'1-metilciclopropene (1-MCP)* PhD Thesis 2005 Dottorato di Ricerca in Biotecnologie degli Alimenti XIX ciclo Univ della Tuscia
10. J. Speirs, C.J. Brady, Modification of gene expression in ripening fruit. *Australian J. Plant Physiol.* 28 (1992) 519-532.
11. I.O. Sanders, K. Ishizawa, A.R. Smith, M.A. Hall, Ethylene binding and action in rice seedlings. *Plant Cell Physiology* 31 (1990) 1091-1099.
12. I. Fratoddi, C. Battocchio, A. La Groia, M.V. Russo, Nanostructured polymetallaynes of controlled length: synthesis and characterization of oligomers and polymers from 1,1'-bis-(ethynyl)4,4'-biphenyl bridging Pt(II) or Pd(II) centres, *J. Polymer Sci, Part A Polymer Chemistry* 45(2007) 3311-3329
13. C. Battocchio, I. Fratoddi, M.V. Russo, G. Polzonetti, H₂S gas interaction with Pt(II) containing polymetallaynes of selected chain length: an Xps and Exafs study, *Journal of Physical Chemistry A* 112(2008); 7365-7373
14. C. Caliendo, I. Fratoddi, C. Lo Sterzo, M.V. Russo, Response of a Pt-Polyyne membrane in surface acoustic wave sensors: experimental and theoretical approach, *J. Appl. Phys.* 93 (2003) 10071
15. I. Venditti, I. Fratoddi, C. Palazzesi, P. Proposito, M. Casalboni, C. Cametti, C. Battocchio, G. Polzonetti, M.V. Russo, Self-assembled nanoparticles of functional copolymers for photonic applications, *Journal of Colloid and Interface Science*, 348(2010), 424-430
16. I. Venditti, I. Fratoddi, A. Bearzotti, Self-assembled copolymeric nanoparticles as chemically interactive materials for humidity sensors, *Nanotechnology* 21 (2010) 355502 (8pp)
17. D.W. Turner, Bananas and plantains. In: Mitra SK, (Ed.) *Postharvest Physiology and Storage of Tropical and Subtropical Fruits*, (1997) 47-83. New York: CAB International.

18. R.B.H. Wills, W.B. Mc Glasson, D. Graham, D.C. Joyce, *Postharvest: An Introduction to the Physiology and Handling of Fruit, Vegetables and Ornamentals* (4th ed.) (1998) Sydney: UNSW Press Ltd
19. B.C. Peacock, 'Mixed ripe' a problem for the banana industry. *Queensland Agricultural Journal* 101 (1975) 201-204.
20. A.K.Thompson, O.J. Burden, *Harvesting and fruit care*. In: Gowen S, (Ed.) *Bananas and Plantains*, (1995) 403-433. London: Chapman & Hall.
21. P. John, J. Marchal, *Ripening and biochemistry of the fruit*. In: Gowen S, (Ed.) *Bananas and Plantains*, (1995) 434-467. London: Chapman & Hall.
22. Y. Liu, N.E. Hoffman, S.F. Yang, Promotion by ethylene of the capability to convert 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid to ethylene in preclimacteric tomato and canteloupe fruits. *Plant Physiology* 77 (1985) 407-411.
23. R.E. Paull, Ethylene, storage and ripening temperatures affect Dwarf Brazilian banana finger drop. *Postharvest Biology and Technology* 88 (1996) 65–74
24. R. D'Amato, I. Venditti, M. V. Russo, M. Falconieri; Growth Control and Long range Self-assembly of Polymethylmethacrylate Nanospheres, *Journal of Applied Polymer Science* 102 (2006) 4493-4499
25. R. D'Amato, L. Medei, I. Venditti, M. V. Russo, M. Falconieri, Chemical synthesis of polyphenylacetylene nanospheres with controlled dimensions for photonic crystals, *Materials Science & Engineering C* 23 (2003) 861-865

Curriculum scientifico del gruppo di lavoro impegnato nell'attività.

Prof.ssa Maria Vittoria Russo, Professore Ordinario di Chimica Inorganica

Maria Vittoria Russo è professore ordinario del corso di Chimica Inorganica e di Chimica dei Materiali Polimerici presso il Dipartimento di Chimica dell'Università di Roma "Sapienza". È socio della SCI e socio fondatore dell'AISEM (Associazione Nazionale Sensori e Microsistemi).

Gli interessi di ricerca si sono sviluppati nel campo dei composti organometallici, dei polimeri a delocalizzazione di elettroni π e a struttura nanometrica, con particolare attenzione per gli sviluppi applicativi nel campo dell'optoelettronica, della sensoristica e delle biotecnologie.

Le attuali linee di ricerca sono rappresentate da quattro settori:

- 1) Sintesi e caratterizzazione di complessi simmetrici e asimmetrici di metalli di transizione, come leganti di nanoparticelle di oro, con particolari proprietà di fotoluminescenza;
- 2) Sintesi e caratterizzazione di complessi polinucleari (essenzialmente di Pt e Pd) in cui i nuclei metallici sono coordinati da spaziatori organici a diversa delocalizzazione elettronica per modulare le caratteristiche di trasferimento di carica; tali sistemi funzionalizzati con gruppi tiolici sono adatti alla realizzazione di SAMs (Self Assembled Monolayers);
- 3) Sintesi e caratterizzazione di chimico-fisica (mediante tecniche spettroscopiche tradizionali ed avanzate (XPS e NEXAFS) di polieni e poliini puramente organici oppure organometallici (ottenuti da monomeri acetilenici) che possono presentare caratteristiche di polarizzabilità e/o di allineamento molecolare;
- 4) Realizzazione di membrane polimeriche (materiali nanostrutturati) per applicazioni biotecnologiche (immobilizzazione di biomolecole), per la realizzazione di sensori chimici di molecole in fase gassosa e in fase vapore e per dispositivi elettroottici e cristalli fotonici.

La produzione scientifica è rappresentata da un brevetto internazionale sulla preparazione di polimeri nanostrutturati, da oltre 200 pubblicazioni su riviste scientifiche internazionali e da circa altrettante comunicazioni a congressi. È Editor di un testo scientifico intitolato "Advances in macromolecules: perspectives and applications", pubblicato dalla Springer (2010) 275 pagine, ISBN 978-90-481-3191-4. È referee per numerose riviste scientifiche di riconosciuto valore internazionale.

Dott. sa Ilaria Fratoddi, Ricercatore. Dipartimento di Chimica dell'Università Sapienza di Roma

Ilaria Fratoddi è ricercatore nel settore CHIM/03 Chimica Inorganica dal 2005, presso il Dipartimento di Chimica della Sapienza, Università di Roma, dove svolge la propria attività didattica e di ricerca, partecipando inoltre a commissioni ed attività organizzative del Dipartimento.

Gli interessi di ricerca della Dott.ssa Fratoddi si sono sviluppati su linee tematiche nell'ambito della Chimica Inorganica tra loro strettamente connesse e multidisciplinari: sintesi di composti di coordinazione (complessi di Pd e Pt), di materiali polimerici ad estesa coniugazione elettronica e sistemi nanostrutturati con la loro caratterizzazione spettroscopica. In particolare l'attività di ricerca si è focalizzata sulla sintesi e caratterizzazione di molecole modello e relativi sistemi polimerici nanostrutturati a coniugazione elettronica, contenenti o meno metalli di transizione, come poliini, polieni e sistemi multiporfirinici per applicazioni in optoelettronica, sensoristica, e biotecnologia. Su questi sistemi sono stati condotti approfonditi studi per la caratterizzazione e per le loro applicazioni come sensori, materiali per l'ottica e la fotonica in funzione delle loro caratteristiche morfologiche e funzionali. Un settore di grande attualità verte sulla sintesi e caratterizzazione di nanoparticelle metalliche contenenti Au, Ag o Pt, stabilizzate con tioli organici o organometallici e sistemi core shell stabilizzati da leganti polimerici, le cui prospettive applicative vanno dalla sensoristica alla catalisi ed alla biotecnologia. Un aspetto fondamentale in questo ambito è la accurata definizione morfologica e strutturale dei sistemi per la formazione di strutture ordinate ed ad elevata definizione chimica. Attraverso la collaborazione con vari gruppi di ricerca nazionali ed

internazionali è stato sviluppato lo studio delle applicazioni dei vari materiali in sensoristica, ottica e biotecnologia.

E' membro della Società Chimica Italiana dal 1996, referee per riviste internazionali, revisore nella valutazione di prodotti di ricerca conferiti alla VQR, referente per l'Area CUN CHIM03. La sua attività di ricerca è stata presentata in diversi seminari su invito e più di 100 congressi internazionali. La dott.ssa Ilaria Fratoddi è autrice di 79 pubblicazioni, di cui: 64 pubblicazioni scientifiche su riviste internazionali ISI, 1 brevetto internazionale H index = 13.

Dott. sa Iole Venditti, Dipartimento di Chimica dell'Università Sapienza di Roma

Iole Venditti è titolare di Assegno di Ricerca presso il Dipartimento di Chimica dell'Università di Roma "Sapienza". PhD in Scienza dei Materiali nel 2007, con tesi dal titolo "Synthesis and characterization of nanostructured polymers for optical, electronic, and biological applications". Socio della Società Chimica Italiana e referee per numerose riviste scientifiche di riconosciuto valore internazionale. L'attività scientifica della Dr.ssa Iole Venditti riguarda tematiche inerenti i Materiali Micro e Nano-strutturati per applicazioni tecnologiche avanzate. Per la realizzazione di tali materiali sono stati utilizzati sia metalli nobili (Au, Ag, Pt, Pd) che materiali polimerici, ottenibili in dimensioni micro –nanometriche e forme controllate tramite due diversi approcci: l'approccio bottom up o l'approccio top down. Nell'approccio bottom up la Sintesi Chimica è lo strumento chiave per realizzare un materiale con specifiche qualità strutturali e funzionali; il metodo di sintesi e i relativi parametri sperimentali vengono di volta in volta studiati e ottimizzati in vista della particolare applicazione del nanomateriale nell'optoelettronica, sensoristica o biomedicina. Tutto ciò è reso possibile lavorando in stretta sinergia con altri settori scientifici, come il settore della fisica, dell'ingegneria e della biologia, e mette in evidenza il carattere multidisciplinare di questo campo di ricerca, come testimoniato anche dalle pubblicazioni su riviste internazionali. Infatti 32 sono le pubblicazioni su riviste scientifiche internazionali e circa 50 comunicazioni a congressi, oltre un brevetto internazionale.