



**Politecnico  
di Torino**

## **Politecnico di Torino**

Corso di Laurea in Ingegneria Gestionale

A.A. 2023/2024

Sessione di Laurea luglio 2024

# **Sistema di controllo qualità per il monitoraggio del packaging alimentare riutilizzabile nell'economia circolare**

Relatore:  
Alessandro Simeone

Candidato:  
Ricciuti Federico

*Vorrei dedicare questa Tesi di Laurea ai miei genitori, i quali mi hanno costantemente supportato nella totalità del mio corso di studi. A loro rivolgo i miei più sentiti ringraziamenti, essendomi stati vicini sia nei momenti di successo che in quelli di insuccesso.*

*Con questa tesi si conclude il mio percorso universitario in Ingegneria Gestionale, durato sei anni e mezzo. Durante il corso di studi ho ricevuto un'ottima formazione in svariate materie di mio interesse e, in tal senso, desidero ringraziare tutti i docenti che mi hanno guidato in questi anni.*

*Uno speciale ringraziamento va anche al mio relatore, Alessandro Simeone, che mi ha assistito con estrema disponibilità lungo l'intera scrittura della mia Tesi di Laurea. Ci tengo a riconoscere anche il forte supporto del professore Elliot Woolley dell'Università inglese di Loughborough, avendomi fornito l'intero materiale utile per il lavoro di ricerca per questa Tesi.*

*Infine, ma non per importanza, vorrei ringraziare anche i miei nonni, che mi sono stati sempre accanto negli alti e nei bassi del mio percorso accademico, la mia fidanzata, con la quale ci siamo sostenuti a vicenda nei momenti più difficili, il resto della famiglia ed i miei amici. Se non fosse stato per tutti loro, probabilmente avrei vissuto l'Università con un grado di spensieratezza inferiore.*

# Introduzione

Tra i settori più influenti dell'industria moderna vi è quello alimentare, nello specifico quello del *food packaging*. L'imballaggio degli alimenti negli ultimi decenni ha subito una radicale trasformazione, sia dal punto di vista dei materiali adoperati sia per quanto concerne gli obiettivi che l'intero settore del packaging alimentare si pone. In parallelo all'evoluzione tecnologica che ha caratterizzato la totalità delle industrie, si è ricercata una maggiore attenzione per quanto concerne l'aspetto della sicurezza dei confezionamenti.

Il controllo qualità emerge come un argomento chiave all'interno di questa tesi. In particolare, sono state studiate diverse tecniche di elaborazione delle immagini digitali per verificare la presenza di contaminazioni all'interno di specifici contenitori in plastica.

Nei primi due capitoli viene fornita una doverosa contestualizzazione per la comprensione del caso di studio analizzato nei successivi due capitoli. Nel dettaglio, il primo capitolo offre una giustificazione della ricerca con l'analisi di statistiche sullo smaltimento, riciclo e riutilizzo del packaging alimentare. Il secondo capitolo esamina le tecnologie abilitanti a riguardo, con un particolare focus sull'economia circolare e sul controllo qualità dei confezionamenti. Il terzo capitolo si concentra sul caso di studio, quindi sulle singole tecniche di *image processing* adoperate per l'analisi del dataset di immagini dei packaging. Infine, il quarto capitolo evidenzia delle possibili applicazioni e ottimizzazioni del metodo studiato.

# Indice

<b>1) Il packaging alimentare .....</b>	<b>1</b>
1.1) Le tipologie .....	2
1.2) Finalità principali.....	3
1.3) Idoneità alimentare.....	5
1.4) Impatto ambientale.....	7
1.4.1) Uno sguardo alla realtà e al futuro.....	10
1.4.2) Smart packaging .....	13
<b>2) Le tecnologie abilitanti .....</b>	<b>16</b>
2.1) Introduzione all'economia circolare .....	17
2.1.1) <i>Take-make-use-dispose</i> .....	18
2.1.2) La soluzione circolare.....	23
2.1.3) Cradle to cradle .....	31
2.2) La circolarità nel packaging.....	33
2.2.1) Il caso della plastica .....	34
2.2.2) La logistica inversa .....	36
2.3) Diversificazione dei materiali .....	42
<b>3) Il caso di studio .....</b>	<b>46</b>
3.1) Elaborazione di immagini digitali.....	46
3.2) Setup sperimentale .....	51
3.3) La procedura operativa .....	58
3.3.1) Equalizzazione dell'istogramma .....	60
3.3.2) Spazio colore HSV .....	64
3.3.3) Local Adaptive Thresholding .....	70
3.3.4) Clustering k-means .....	74
<b>4) Applicazioni e risultati.....</b>	<b>77</b>
4.1) Gli scenari.....	77
4.2) I risultati.....	86
4.3) “Extrasegmentazione” .....	90
4.4) Ottimizzazione del processo .....	93
<b>Considerazioni finali.....</b>	<b>98</b>
<b>Bibliografia.....</b>	<b>99</b>

Appendice A1 .....	106
Appendice A2 .....	107
Appendice A3 .....	108
Appendice A4 .....	109
Appendice A5 .....	110
Appendice A6 .....	111
Appendice A7 .....	112
Appendice A8 .....	113
Appendice A9 .....	114
Appendice A10 .....	115
Appendice A11 .....	116
Appendice A12 .....	117
Appendice A13 .....	118
Appendice A14 .....	119
Appendice A15 .....	120
Appendice A16 .....	121
Appendice A17 .....	122
Appendice A18 .....	123

# Capitolo 1

## Il packaging alimentare

Il *food packaging* rappresenta al giorno d'oggi una componente essenziale all'interno della moderna industria alimentare, svolgendo un ruolo cruciale nella protezione, nella conservazione e nella presentazione dei prodotti alimentari [1]. Oltre a soddisfare requisiti pratici di trasporto e stoccaggio, il packaging alimentare è diventato un elemento fondamentale per comunicare informazioni ai consumatori, influenzando le decisioni d'acquisto e contribuendo alla creazione di un'identità di marca [2].

Nella filiera dell'industria alimentare spesso ci si concentra principalmente sulle fasi di reperimento, preparazione e analisi del prodotto alimentare, meno, invece, su come quest'ultimo debba mantenere le sue caratteristiche qualitative nel tempo, cioè fino al termine del suo ciclo di vita. In questo contesto il settore del food packaging si integra nella complessa filiera dell'industria alimentare, richiedendo competenze specifiche sia dal punto di vista delle caratteristiche del prodotto in sé sia per quanto concerne le tecnologie che regolano il settore stesso.

Il packaging nasce inizialmente con l'intento di creare una barriera tra il prodotto e il mondo esterno, con l'obiettivo di preservarne le qualità. Successivamente, diventa un mezzo per facilitare il trasporto e la consegna, assumendo oggi non solo una funzione pratica, ma anche estetica [3].

Lo scopo di questo capitolo è quello di analizzare il packaging alimentare nelle sue generalità, esaminando prima le sue caratteristiche fondamentali e successivamente considerando le implicazioni ambientali connesse. Si presta una particolare attenzione al tema della sostenibilità, il quale costituisce la base per l'approfondimento sull'economia circolare affrontato nel capitolo successivo, nonché sullo smaltimento, riciclo e riutilizzo del packaging alimentare.

# 1.1 Le tipologie

Il design degli imballaggi varia notevolmente in base alla funzione che caratterizza i diversi tipi di confezioni e contenitori, nonché in relazione ai prodotti alimentari e alle loro esigenze specifiche. È importante distinguere, a tal proposito, varie tipologie, o livelli, di imballaggio [4].

## **Imballaggio primario**

L'imballaggio primario costituisce il livello che risulta direttamente a contatto con i prodotti alimentari. Ha la funzione principale di creare lo spazio di contenimento ideale, fornendo una protezione ottimale dagli agenti esterni. Inoltre, questo livello, noto anche come imballaggio per la vendita al dettaglio, è subito visibile al cliente in fase di acquisto. In questo senso, l'imballaggio primario viene concepito in modo tale da rappresentare per il consumatore finale una definita unità di vendita.

## **Imballaggio secondario**

Il secondo livello è rappresentato da un sistema di contenimento di uno o più contenitori primari, quindi a diretto contatto non con il prodotto ma con il livello primario. L'imballaggio secondario, chiamato anche imballaggio multiplo, è dunque concepito per costituire un raggruppamento di imballaggi primari nel punto di vendita ed ha una funzione utile ad aumentare la protezione meccanica. Inoltre, semplifica la movimentazione della confezione durante il trasporto e, a talvolta, può fungere anche da supporto per l'esposizione dei prodotti nei punti vendita.

## **Imballaggio terziario**

L'imballaggio terziario costituisce il livello più esterno e consiste nell'insieme di più contenitori primari o secondari. Si tratta di un livello di confezionamento puramente orientato al trasporto ma che non ha niente a che vedere con i *container*, che possono contenere più imballaggi terziari, o ai *bulk packaging*<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> I *bulk packaging* sono grandi contenitori da reparto che vengono utilizzati per merce sfusa come sacchi di consistenti dimensioni, fusti, carrelli etc. Per questa tipologia di contenitori si utilizza, meno di frequente, l'espressione "imballaggio quaternario".

Tra le tipologie di packaging di terzo livello maggiormente impiegate vi sono casse, bancali, scatoloni e pedane. Nel linguaggio tecnico del packaging rientrano inoltre svariati termini che – pur essendo stati introdotti come nomi commerciali per indicare specifici materiali o imballaggi – sono diventati per consuetudine parole d’uso generale, che identificano famiglie di prodotti simili; situazioni di questo tipo sono per esempio rappresentate dalle parole Cellophane, Nylon, Saran, Tetrabrik, Bag in Box, Flow pack, Cryovac, Doypack e così via [4].

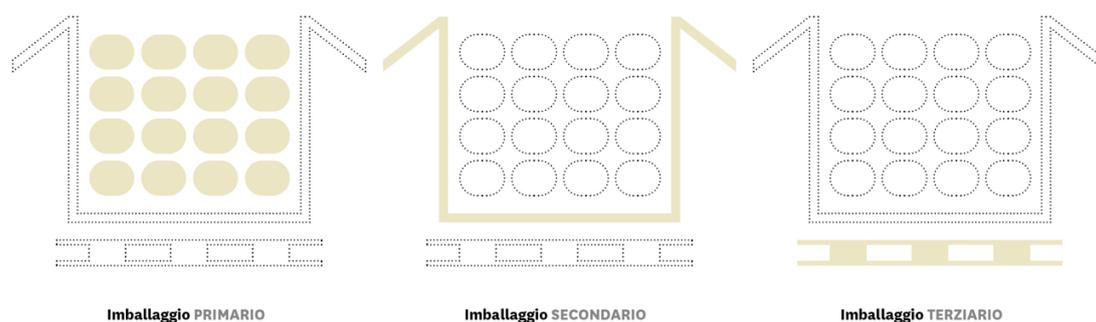


Fig.1 Le tre categorie di imballaggio [5].

## 1.2 Finalità principali

Il confezionamento degli alimenti svolge una serie di ruoli fondamentali che influenzano diversi aspetti della vita di un prodotto alimentare industriale. Qualsiasi elenco sulle molteplici funzioni del packaging alimentare non risulterebbe mai esaustivo né realmente chiarificatore, poiché le finalità sono realmente molteplici e, in una certa misura, anche mutevoli. In termini generali, comunque, è ragionevole fare riferimento a cinque indiscutibili funzioni fondamentali [4]: contenimento, protezione, comunicazione, servizio e logistica.

## **Contenimento**

Il confezionamento fornisce un contenitore adeguato per gli alimenti, proteggendoli e mantenendoli in una forma sicura durante le fasi di produzione, stoccaggio e trasporto. Questo è particolarmente importante per i prodotti "free flowing" come liquidi o polveri, che richiedono contenitori specifici per evitare perdite o danni.

## **Protezione**

Qualsiasi forma di packaging rappresenta l'interfaccia tra il prodotto e l'ambiente circostante; quindi, il contenitore costituisce una fondamentale barriera protettiva il cui fine ultimo è quello di mantenere la qualità originale dell'alimento. La protezione del prodotto da intendere nel modo più ampio possibile, nei confronti delle sollecitazioni meccaniche, delle influenze di luce, umidità ed ossigeno, di tutte le possibili forme di contaminazione chimiche o biologiche provenienti dall'esterno, nonché delle possibili manipolazioni indesiderate o fraudolente.

## **Comunicazione**

L'imballaggio è stato definito il *silent seller* (venditore silenzioso), per sottolineare la valenza di comunicazione che è insita in qualsiasi forma di packaging e che viene esaltata dalla trasformazione dei sistemi di distribuzione commerciale nelle forme a libero servizio (*self-service*). Forma, colore e aspetto di un imballaggio possono contribuire notevolmente al successo commerciale di un prodotto; infatti, nella progettazione e nello sviluppo di una nuova confezione sono sempre coinvolti esperti provenienti da settori quali marketing e comunicazione.

## **Servizio**

Tra le numerose funzioni dell'imballaggio questa si rivela la più recente, sebbene sia divenuta rapidamente di grande importanza per la sua capacità di assecondare le esigenze del consumatore. Il packaging moderno, infatti, offre funzionalità aggiuntive per soddisfare le esigenze dei consumatori, come aperture facili, chiusure richiudibili, compatibilità con forni a microonde, e altre tipologie di utilità.

## Logistica

Il packaging è indispensabile per ottimizzare il flusso dei prodotti alimentari lungo la catena di distribuzione, contribuendo a una gestione il più efficiente della supply chain.

Le economie che possono derivare dall'ottimizzazione dell'aspetto logistico del packaging sono significative e giustificano investimenti consistenti in questo contesto.



*Fig.2 Esempi di imballaggi per alimenti [6].*

## 1.3 Idoneità alimentare

Un prerequisito fondamentale per gli imballaggi ad uso alimentare è la loro idoneità, intesa sostanzialmente come la qualità del materiale destinato ad entrare in contatto con gli alimenti. Questo, infatti, non deve apportare alcuna modifica o contaminazione, sia essa di natura chimica, microbiologica o sensoriale, al prodotto alimentare [7].

La sicurezza e l'idoneità dei contenitori destinati al contatto con gli alimenti sono regolamentate da norme sia a livello nazionale che europeo

aventi come obiettivo primario quello di garantire la protezione della salute pubblica. Queste norme sono soggette a continue modifiche e aggiornamenti per adeguarsi ai progressi scientifici e tecnologici, nonché alle esigenze emergenti nel settore alimentare.

Tra i principi fondamentali [4] che guidano la regolamentazione in questo ambito vi sono:

**Principio dell'inerzia del materiale e della purezza dei prodotti alimentari:** stabilisce che i materiali e gli oggetti destinati al contatto con gli alimenti non devono rilasciare sostanze in quantità tali da rappresentare un pericolo per la salute umana o da alterare in modo inaccettabile la composizione nutritiva o le caratteristiche sensoriali dei prodotti alimentari.

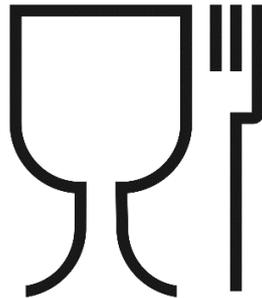
**Principio della "etichettatura positiva":** prevede che i materiali o gli oggetti destinati al contatto con gli alimenti debbano essere accompagnati da documenti che ne attestino l'idoneità; devono essere contrassegnati con l'indicazione "per alimenti" o con un simbolo appropriato (*Fig.3*).

**Standardizzazione delle procedure di verifica e individuazione delle responsabilità:** riguarda l'implementazione di procedure standardizzate per verificare la conformità dei materiali destinati al contatto con gli alimenti, nonché l'individuazione chiara delle responsabilità delle varie parti coinvolte nella catena di produzione e distribuzione.

Se da una parte la sicurezza alimentare è diventata una priorità assoluta, con annesse normative che stabiliscono i requisiti per l'idoneità dei materiali destinati al contatto con gli alimenti, dall'altra l'impatto ambientale dei materiali da imballaggio è diventato una preoccupazione sempre più evidente. La crescente consapevolezza sull'emergenza climatica e sull'inquinamento plastico ha spinto l'industria alimentare verso soluzioni più sostenibili. Materiali biodegradabili, riciclabili e compostabili stanno guadagnando terreno come alternative agli imballaggi tradizionali a base di plastica [8]. In aggiunta, l'ottimizzazione dei processi produttivi e l'adozione di pratiche di riduzione degli sprechi contribuiscono a minimizzare l'impatto ambientale dei packaging alimentari sull'intero ciclo di vita degli alimenti [9].

Assume, quindi, una primaria importanza la questione di affrontare la sfida del bilanciare la sicurezza alimentare con la sostenibilità ambientale.

L'industria alimentare deve continuare a investire in ricerca e sviluppo per introdurre materiali da imballaggio sempre più sicuri e sostenibili. Allo stesso tempo, i regolatori devono collaborare con le parti interessate per sviluppare normative chiare e coerenti che promuovano l'adozione di pratiche sostenibili nell'intera catena di distribuzione alimentare.



*Fig.3 Simbolo introdotto con il regolamento UE 1935/2004 che serve ad indicare i MOCA<sup>2</sup> che non rilasciano sostanze nocive a contatto con gli alimenti [10].*

## 1.4 Impatto ambientale

L'industria del packaging è un settore diversificato che coinvolge una vasta gamma di attività e settori. Questa eterogeneità è evidente nella varietà di materiali utilizzati, nei processi di produzione e nelle tecnologie impiegate. In Europa, il settore del packaging gode di un elevato sviluppo e rappresenta una parte significativa dell'industria globale dell'imballaggio. Circa un terzo di tutto l'imballaggio utilizzato nel mondo viene prodotto in Europa, generando un valore stimato di circa 130 miliardi di euro [4]. Le aziende europee del settore sono altamente orientate all'esportazione, servendo, oltre al mercato interno, anche una vasta popolazione al di fuori dei confini dell'Unione Europea. I consumi di materiali indirizzati

---

<sup>2</sup> Con l'acronimo MOCA si intendono quei materiali ed oggetti destinati ad entrare in contatto con gli alimenti in maniera sistematica, descritti nel Regolamento Quadro EC 1935/2004. Oltre ai classici materiali destinati ad entrare a contatto con gli alimenti, rientrano tra i MOCA anche i macchinari industriali destinati alla produzione di prodotti alimentari.

ai packaging sono ripartiti nello stesso modo in tutto il mondo industrializzato, seguendo una forma di questo tipo (valori in peso): 40% materiali cellulosici, 30% plastiche, 19% metalli e 7% vetro. Il settore del packaging europeo è destinato a espandersi ulteriormente, sia per l'ampliamento dell'Unione sia per l'innalzamento del livello di vita in molti dei nuovi Paesi membri. Nel triennio 2007-2009, l'economia del packaging europeo ha registrato una crescita di circa il 2%, in linea con le previsioni negli Stati Uniti e in Giappone, ma inferiore rispetto a quelle previste in Russia (6,9%), Cina (8,2%) e India (14,2%).

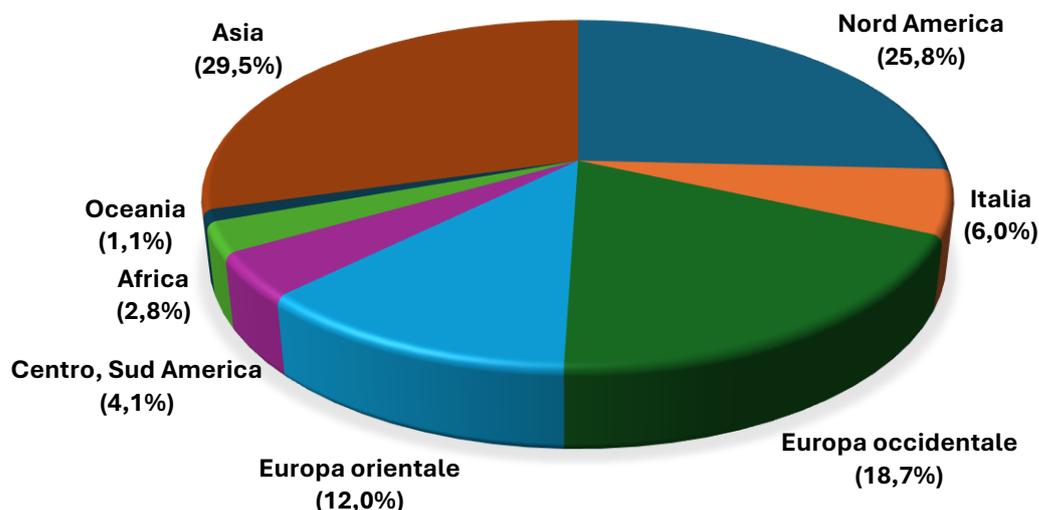


Fig.4 Ripartizione in termini di fatturato della produzione mondiale di packaging [4].

Questi dati evidenziano l'importanza e il dinamismo del settore del packaging in Europa, che continua a svolgere un ruolo chiave nell'economia globale e nel soddisfare le crescenti esigenze dei consumatori in tutto il mondo. Con il costante sviluppo tecnologico e l'accento sulla sostenibilità, il settore del packaging è destinato a rimanere un motore trainante dell'industria manifatturiera europea nel futuro prossimo.

Il packaging rappresenta, oltretutto, una fetta significativa del fatturato dell'industria manifatturiera nel nostro Paese, situandosi tra il 2,5% e il 3%, e contribuisce fino all'1,6% del PIL nazionale. Questo settore non è solo economicamente rilevante, ma ha anche un impatto sociale

significativo, impiegando nel 2007 più di 100.000 lavoratori [4]. Considerando sia i produttori che i trasformatori di imballaggi e accessori per il confezionamento, il fatturato supera i 25 miliardi di euro, posizionandosi al di sopra di altre importanti industrie di trasformazione e classificandosi ai vertici delle classifiche europee.

Particolarmente rilevante è il comparto del packaging alimentare, che ha mostrato una crescita costante negli ultimi anni. Secondo i dati più recenti disponibili, le applicazioni non alimentari rappresentano poco meno del 33% in peso dei materiali di packaging, mentre quelle legate alle bevande costituiscono quasi il 32% e quelle dei prodotti alimentari il 35,5%. Questi dati testimoniano l'importanza cruciale del packaging alimentare nell'industria globale del confezionamento.

Per analizzare ulteriormente il panorama del packaging, è utile suddividerlo in comparti basati sul materiale utilizzato. Nella tabella seguente sono riportati alcuni dati relativi ai principali materiali di confezionamento, secondo le informazioni fornite dall'Istituto Italiano Imballaggio.

*Tab.1 Fatturato e produzione delle principali filiere dell'imballaggio nazionale [4].*

	<b>Fatturato (10<sup>3</sup> €)</b>	<b>Produzione (10<sup>6</sup> kg)</b>
<b>Acciai rivestiti</b>	1070	684
<b>Alluminio</b>	1920	171
<b>Cellulosici</b>	7000	5303
<b>Poliaccoppiati (semirigidi)</b>	380	132
<b>Plastica</b>	10500	3383
<b>Vetro</b>	1080	3641
<b>Legno</b>	1700	3169

## 1.4.1 Uno sguardo alla realtà e al futuro

Nonostante gli sforzi compiuti a livello nazionale ed europeo, la quantità di rifiuti prodotti non è in diminuzione. Ogni anno nell'Unione Europea le attività economiche generano complessivamente 2,5 miliardi di tonnellate di rifiuti, equivalenti a 5 tonnellate pro capite; se non si agisce in tempi brevi, si registrerà un ulteriore aumento del 19% dei rifiuti, soprattutto per quanto concerne i rifiuti da imballaggio in materiale plastico [11]. La non corretta gestione dei rifiuti in plastica ha comportato inquinamento e dispersione degli stessi sia nell'ambiente terrestre sia in quello marino, attirando quotidianamente l'attenzione dei media sul problema. Di fronte a questo tema è aumentata anche la sensibilità del consumatore, che presta un interesse sempre maggiore riguardo alla salute degli ecosistemi, all'impatto ambientale e alla sostenibilità.

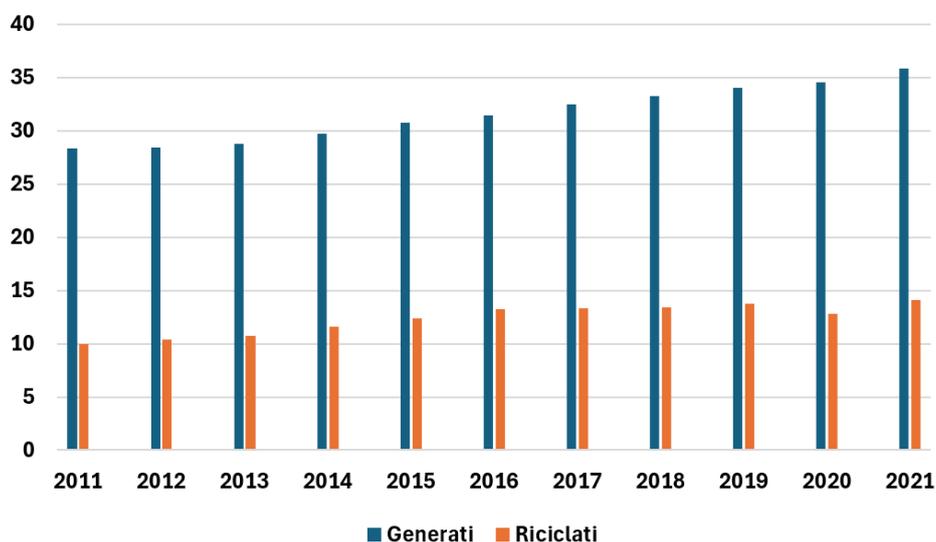


Fig.5 Rifiuti di packaging in plastica generati e riciclati nell'UE (dati in kg per capita) [12].

Secondo alcuni dati pubblicati da Eurostat nel 2022 [12], nel 2021 l'UE ha generato 84 milioni di tonnellate di rifiuti di imballaggio, di cui il 40,3%

riguardano unicamente carta e cartone. Poi, in ordine, la plastica ha rappresentato il 19,0%, il vetro il 18,5%, il legno il 17,1% e il metallo il 4,9%. Rispetto all'anno precedente, sono aumentati sia la produzione di rifiuti di imballaggio in plastica che il loro riciclo: la produzione è aumentata di 1,4 kg pro capite (+4,0%) e il riciclo di 1,2 kg pro capite (+9,5%), il che significa che ogni persona che vive nell'UE ha generato in media 35,9 kg di rifiuti di imballaggi in plastica, riciclandone 14,2 kg.

Analizzando la tendenza nel periodo tra il 2011 e il 2021, la quantità pro capite di rifiuti di imballaggio in plastica generata è aumentata del 26,7% (+7,6 kg/pro capite). Un tampone parziale a questo dato allarmante è l'aumento del 38,1% (+3,9 kg/pro capite), nel medesimo decennio, della quantità riciclata di rifiuti di imballaggio in plastica.

Nel 2021, Slovenia, Belgio e Paesi Bassi hanno riciclato quasi la metà dei rifiuti di packaging in plastica generati, rispettivamente nelle percentuali del 50%, 49,2% e 48,9%. Chiudono la classifica dei Paesi Europei, con meno di un quarto dei rifiuti di imballaggio in plastica riciclati, Malta (20,5%), Francia (23,1%) e Svezia (23,8%).

Al di là della plastica, il Belgio è il Paese in testa in termini di riciclo e riutilizzo degli imballaggi in UE, con il 99,1% di tasso di riuso e l'80,4% di tasso di riciclo. Tra i virtuosi anche l'Italia, che nel 2021 ha raggiunto un tasso di riuso del 79,6% e un tasso di riciclo del 72,9%, in linea con la media UE per quanto riguarda il riuso (79,9%), ben al di sopra nel riciclo (64%).

Nel febbraio 2021, il Parlamento europeo ha richiesto norme più severe sul riciclo, con obiettivi vincolanti da raggiungere entro il 2030 sull'uso e sul consumo dei materiali [13]. Inoltre, nell'ottobre 2022 il Parlamento ha approvato una revisione delle norme sugli inquinanti organici persistenti (POP), col fine ridurre la quantità di sostanze chimiche pericolose presenti rifiuti e nei processi di produzione. Nello specifico, le nuove regole introducono limiti più severi, vietando determinate sostanze chimiche e mantenendo gli inquinanti lontani dal riciclo.

La proposta di revisione della legislazione UE prevede il perseguimento di tre principali obiettivi [13]. Innanzitutto, la prevenzione della produzione di rifiuti, mediante un'attenta riduzione della quantità di imballaggi monouso, limitando quelli non necessari e promuovendo opzioni riutilizzabili e ricaricabili.

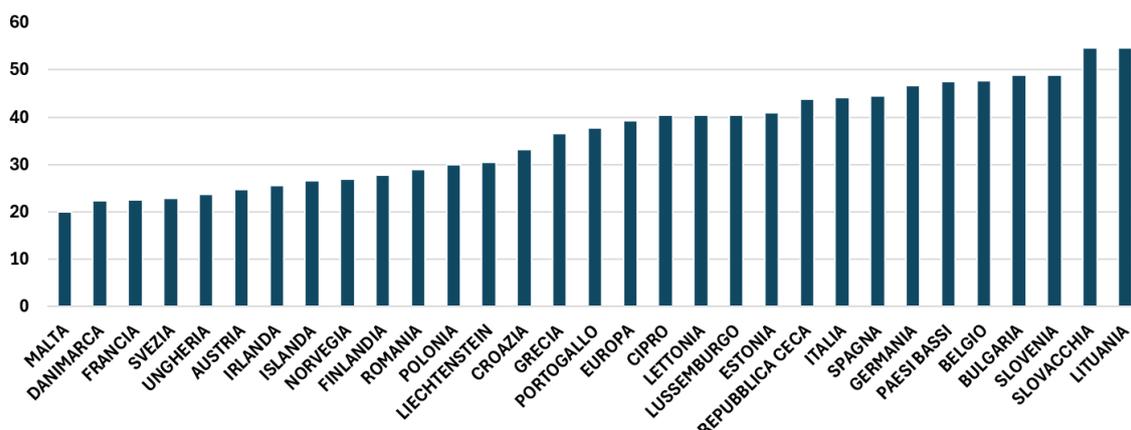


Fig.6 Focus sul tasso di riciclo della plastica in Europa nel 2021 (dati in percentuale) [12].

In secondo luogo, la proposta sottolinea l'importanza di promuovere il riciclo di alta qualità ("ciclo chiuso"), con l'intento di rendere tutte le confezioni presenti sul mercato europeo riciclabili in modo economicamente vantaggioso entro il 2030. Infine, viene posto l'accento sul ridurre la necessità di risorse naturali primarie per creare un mercato ben funzionante per le cosiddette materie prime seconde, aumentando l'uso di plastica riciclata nel settore del packaging alimentare. La proposta stima che, entro il 2030, il 10% degli imballaggi usati per il trasporto nell'e-commerce dovrà essere riutilizzabile, percentuale che salirà al 50% entro il 2040. Inoltre, per alcune tipologie di imballaggio vengono imposte limitazioni allo "spazio vuoto" della confezione anche se riempito con ritagli di carta, cuscini d'aria, pluriball, polistirolo o trucioli.

Le nuove misure mirano a rendere gli imballaggi completamente riciclabili entro il 2030, definendo specifici criteri di progettazione e introducendo sistemi di deposito cauzionale obbligatori per bottiglie di plastica e lattine di alluminio [13]. Inoltre, saranno precisate le tipologie di imballaggi compostabili, consentendo ai consumatori di smaltirli insieme ai rifiuti organici. La stessa etichettatura degli imballaggi si prevede che elimini la confusione su come smaltire i prodotti, indicando chiaramente il materiale di cui sono fatti e il flusso di rifiuti in cui devono essere smaltiti. Le nuove normative definiscono anche percentuali di contenuto riciclato obbligatorie nelle nuove confezioni in plastica, trasformando così la plastica riciclata in una preziosa materia prima.

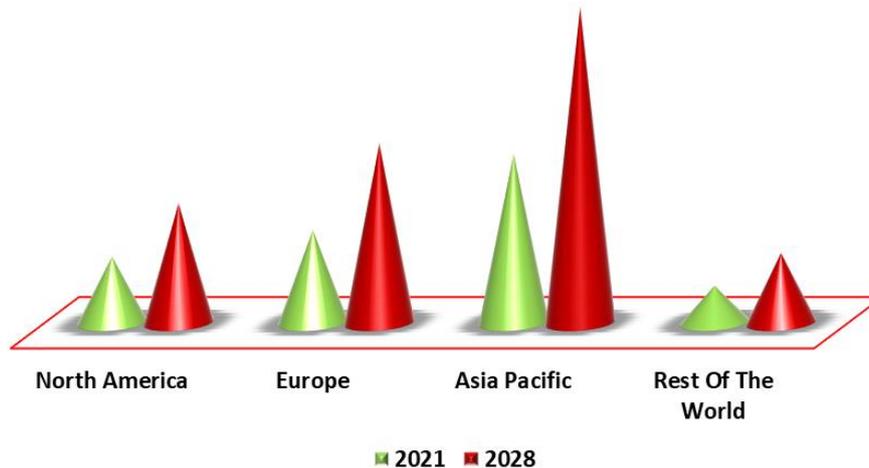


Fig.7 Mercato globale del packaging alimentare [14].

Queste misure prevedono, inoltre, una significativa riduzione delle emissioni di gas serra e dei costi legati ai danni ambientali, contribuendo anche alla creazione di posti di lavoro nel settore del riutilizzo [15].

La Commissione europea ha chiarito anche l'uso delle plastiche *biobased*, compostabili e biodegradabili, stabilendo criteri per un utilizzo responsabile e per un corretto smaltimento. Queste plastiche provengono da biomasse sostenibili e disincentivano l'abbandono dei rifiuti. Le plastiche compostabili saranno consentite solo per determinati prodotti e devono essere accompagnate dalla certificazione per il compostaggio industriale.

## 1.4.2 Smart packaging

Un tema di grande rilievo nel settore alimentare è quello della cosiddetta *shelf-life* (tr., “vita da scaffale”) dei prodotti alimentari [4], la quale è strettamente connessa con il confezionamento degli stessi. La *shelf-life* si riferisce al periodo di tempo durante il quale un alimento, se conservato in opportune condizioni, mantiene la sua qualità, in termini di sicurezza e freschezza. In altre parole, è il periodo di tempo in cui un alimento può essere conservato e venduto senza compromettere la sua gradevolezza nei confronti del consumatore finale.

La *shelf-life* dipende da una serie di fattori, tra cui la natura del prodotto alimentare, le condizioni di produzione, il tipo di confezionamento utilizzato, la manipolazione e la conservazione durante la distribuzione. È importante evidenziare che la *shelf-life* non indica solo la data di scadenza riportata sull'imballaggio, ma rappresenta piuttosto un intervallo di tempo in cui il prodotto mantiene le sue caratteristiche ottimali.

La determinazione della *shelf-life* di un prodotto alimentare si rivela come un processo articolato che coinvolge test di stabilità, valutazioni sensoriali, analisi microbiologiche e chimiche per garantire che il prodotto sia sicuro e gradevole per il consumo durante tutto il suo ciclo di vita.



Fig.7 Rappresentazione insiemistica dello "Smart Packaging" [16].

Le condizioni in fase di produzione dei packaging svolgono un ruolo essenziale nella determinazione della *shelf-life* degli alimenti. L'efficacia del confezionamento è altrettanto importante, in quanto non solo fornisce protezione dagli agenti esterni, come luce, umidità e ossigeno, ma può anche agire attivamente per mantenere la freschezza degli alimenti per un periodo più lungo.

Oltre ai metodi di conservazione più conosciuti quali il sottovuoto, il confezionamento in atmosfera modificata e l'utilizzo di additivi alimentari (conservanti, stabilizzanti, antiossidanti, etc.), sono sempre più diffuse sul

mercato soluzioni come l'utilizzo di “active packaging”, “intelligent packaging” e “smart packaging” [17].

L'**active packaging** interagisce attivamente con il prodotto o l'ambiente circostante per preservarne la freschezza e la qualità. Questo tipo di confezionamento può rilasciare sostanze stabilizzanti per proteggere il prodotto da processi di deterioramento, come l'ossidazione, o catturare sostanze indesiderate, come l'ossigeno, per mantenerne la freschezza. Un esempio pratico di active packaging è rappresentato dai contenitori in grado di generare calore al momento del consumo, offrendo così una soluzione pratica per riscaldare il cibo direttamente nella confezione.

L'**intelligent packaging** fornisce informazioni dirette sullo stato e sulla qualità degli alimenti contenuti (*Fig.8*). Questo tipo di confezionamento può utilizzare indicatori visivi o sensori incorporati per monitorare condizioni come la temperatura, l'umidità o il livello di deterioramento del prodotto. Un esempio sono gli inchiostri reattivi che cambiano colore in base alle condizioni climatiche, consentendo ai consumatori di valutare rapidamente la freschezza del prodotto.

Infine, lo **smart packaging** si concentra sull'offrire condizioni di utilizzo alternative per massimizzare i vantaggi per i consumatori. Questa modalità di confezionamento può includere svariate funzionalità, come l'inserimento di valvole di rilascio per controllare l'ambiente interno della confezione o di materiali speciali che consentono la cottura diretta nel microonde. Queste soluzioni offrono praticità e comodità ai consumatori, consentendo loro di godere appieno dei prodotti alimentari confezionati.



*Fig.8 Sensori di temperatura e ambientali che indicano le condizioni del prodotto [18].*

# Capitolo 2

## Le tecnologie abilitanti

Le sfide legate al packaging alimentare sono numerose e richiedono soluzioni che siano non solo ecologiche, ma anche pratiche ed economicamente sostenibili. Nella ricerca di alternative all'eccessivo spreco delle confezioni per alimenti, è essenziale considerare attentamente le possibilità di attuazione di ciascuna alternativa, valutando i tempi, i costi e altri fattori che possono influenzare la fattibilità delle soluzioni proposte.

Questo capitolo si propone di esaminare le principali migliorie applicabili nel mondo del food packaging, con un particolare focus sull'economia circolare. L'approccio circolare non si limita semplicemente a sostituire i materiali tradizionali con quelli più sostenibili, ma implica anche una rivoluzione nel modo in cui viene concepito l'intero ciclo di vita del packaging alimentare.

L'economia circolare rappresenta un'opportunità per ridurre gli sprechi e massimizzare il valore delle risorse utilizzate nel processo di produzione e distribuzione degli imballaggi alimentari. Attraverso il riutilizzo, il riciclo e la riduzione degli sprechi, la *circular economy* apre la strada verso un sistema di gestione dei packaging più efficiente ed ecologico.

## 2.1 Introduzione all'economia circolare

*"L'economia circolare è un sistema economico pensato per potersi rigenerare da solo. In un'economia circolare i flussi di materiali sono di due tipi: i nutrienti biologici, che possono essere reintegrati nella biosfera, e i nutrienti tecnici, che sono progettati per essere rivalorizzati senza entrare nella biosfera".*

Secondo la sopracitata definizione di economia circolare fornita dalla Ellen MacArthur Foundation<sup>3</sup>, l'economia circolare è un sistema economico pianificato per riutilizzare i materiali in successivi cicli produttivi, riducendo al massimo gli sprechi [19]. Si tratta di un nuovo paradigma economico che si contrappone al modello tradizionale di economia lineare, caratterizzato unicamente dalle fasi di estrazione, produzione, consumo e smaltimento. Invece di seguire questo percorso lineare, che porta inevitabilmente all'esaurimento delle risorse naturali e all'accumulo di rifiuti, l'economia circolare adotta un approccio rigenerativo, in cui i materiali e i prodotti vengono riutilizzati, riparati, rinnovati e riciclati il più a lungo possibile. Questo modello prevede la progettazione dei prodotti in modo tale che possano essere facilmente smontati e riutilizzati, l'adozione di materiali che possano essere reintegrati nei processi produttivi o nella natura senza causare danni e la promozione di nuove forme di consumo che enfatizzino l'uso piuttosto che il possesso.

---

<sup>3</sup> La Fondazione Ellen MacArthur è un'organizzazione no-profit britannica fondata nel 2010, dedicata a promuovere e accelerare la transizione verso un'economia circolare globale attraverso ricerca, formazione e partnership con aziende, governi e istituzioni.

## 2.1.1 *Take-make-use-dispose*

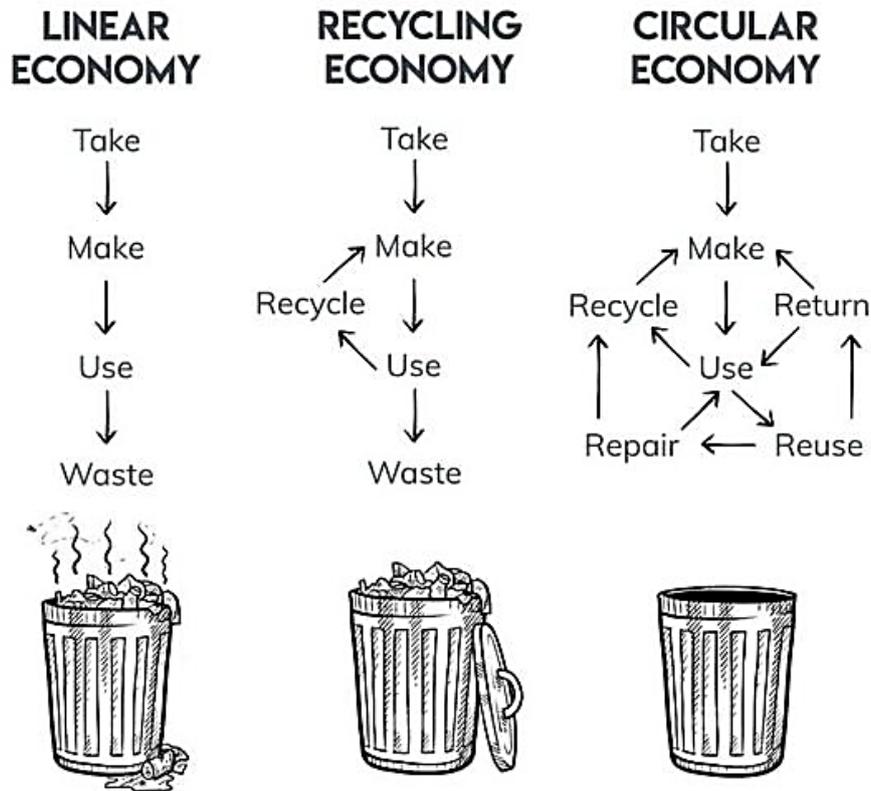


Fig.9 Diagrammi rappresentativi dei differenti modelli economici [20].

Per comprendere appieno i vantaggi e la necessità dell'economia circolare, è essenziale confrontarla con il modello economico tradizionale, ovvero quello lineare. Quest'ultimo, che ha dominato le pratiche industriali e commerciali fin dalla Rivoluzione Industriale, segue un percorso lineare composto da quattro fasi principali: estrazione, produzione, consumo e smaltimento. Questo approccio, spesso descritto con l'esplicitiva dicitura "prendi, produci, usa e getta" (*take-make-use-dispose*), si basa su un uso intensivo delle risorse naturali e porta inevitabilmente alla produzione di grandi quantità di rifiuti [21]. L'economia lineare dipende in modo diretto dall'estrazione continua di materie prime. Con l'aumento della popolazione mondiale e del consumo, le risorse naturali sono sottoposte a una pressione senza precedenti, portando al lento esaurimento di queste ultime [22].

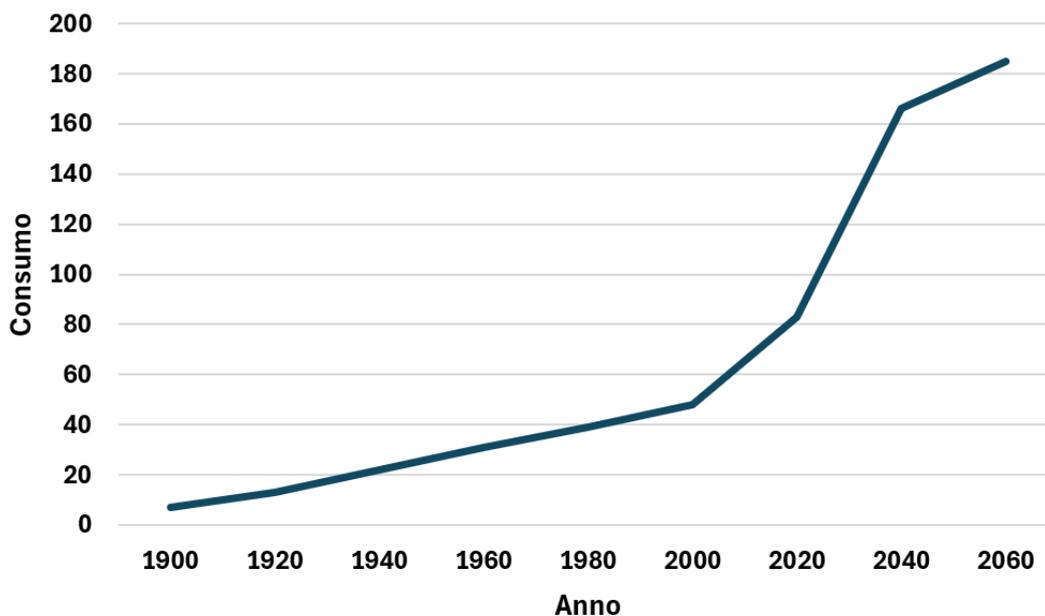


Fig.10 Consumo esponenziale di materie prime in mld. di tonnellate nel XX e nel XXI secolo [22].

A partire dal XIX secolo, la crescita economica si è basata sull'estrazione crescente delle risorse naturali, sull'aumento della produzione di beni standardizzati e sul loro smaltimento finale [22]. L'estrazione di risorse naturali comprende sia risorse non rinnovabili, come materie prime minerali e combustibili fossili, sia risorse rinnovabili, come aria, acqua, suolo o fauna e flora. L'esplosione demografica ed economica del XX secolo, unitamente all'avvento del consumo di massa di prodotti economici e facilmente sostituibili, ha creato un'enorme pressione sull'ambiente, mettendo sempre di più in risalto gli aspetti negativi del modello di economia lineare. Infatti, quest'ultima tende a trascurare due aspetti molto importanti: il fatto che le nostre riserve naturali siano limitate e che la natura abbia bisogno di tempo per rigenerarsi e per mettere a disposizione nuove risorse. A questo ritmo di estrazione, alcune materie prime come il nichel, il rame, il manganese o il cobalto non saranno più disponibili nei prossimi 50 anni, secondo una ricerca recente [22]. Lo stesso discorso vale anche per le risorse naturali rinnovabili.

L'economia lineare è di conseguenza intrinsecamente legata alla produzione di rifiuti e all'inquinamento. Durante la fase di produzione, le industrie generano un considerevole quantitativo di scarti, come materiali non utilizzati o residui di lavorazione, spesso contenenti sostanze chimiche

nocive. Per esempio, l'industria tessile produce scarti di tessuti e coloranti chimici, mentre l'industria elettronica genera rifiuti come metalli pesanti e solventi. Questi rifiuti non solo rappresentano un uso inefficiente delle risorse, ma pongono anche gravi problemi di smaltimento e gestione [23].

Dopo il consumo, molti prodotti finiscono rapidamente come rifiuti a causa del loro breve ciclo di vita o per via della loro obsolescenza programmata [24]. Questo fenomeno è particolarmente evidente nei settori dell'elettronica e dell'abbigliamento, in cui dispositivi e vestiti vengono spesso scartati in favore di modelli più nuovi o alla moda. Alla fine della loro vita utile, i prodotti vengono generalmente smaltiti nelle discariche o inceneriti. Questi metodi di gestione dei rifiuti sono altamente inefficienti e insostenibili, poiché non recuperano il valore intrinseco dei materiali e contribuiscono alla saturazione delle discariche.

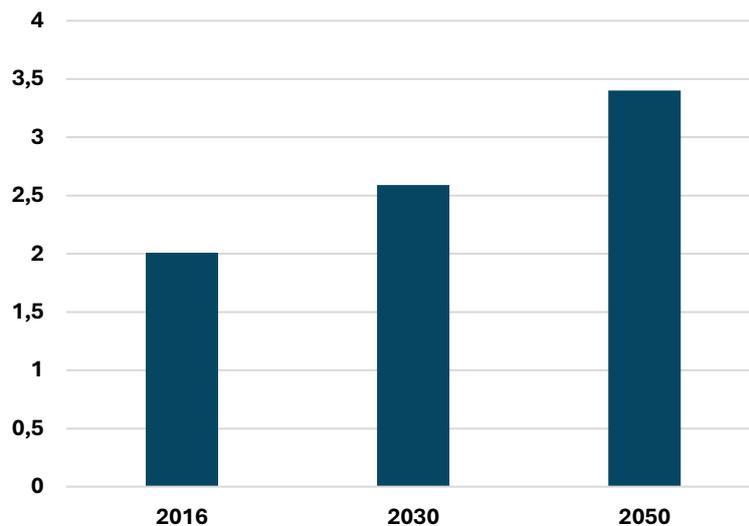


Fig.11 Produzione globale di rifiuti prevista (dati in miliardi di tonnellate) [25]

La produzione e lo smaltimento dei rifiuti comportano, come detto, svariati impatti negativi sull'ambiente e sulla salute umana. Le discariche possono contaminare il suolo e le falde acquifere con sostanze tossiche, mentre i rifiuti plastici nei mari e negli oceani causano danni significativi alla vita marina. I rifiuti organici nelle discariche producono metano, un potente gas serra che contribuisce al riscaldamento globale; l'incenerimento dei

rifiuti, inoltre, sebbene possa ridurre il volume degli stessi, produce emissioni di anidride carbonica e altre sostanze inquinanti.

Risulta chiaro che, in parallelo alla produzione di rifiuti, l'economia lineare comporta anche un elevato livello di inquinamento. Le attività industriali e il trasporto dei rifiuti emettono una vasta gamma di inquinanti atmosferici, come ossidi di azoto, ossidi di zolfo, particolato e composti organici volatili, contribuendo alla formazione di smog, piogge acide e problemi respiratori nella popolazione. Inoltre, i rifiuti industriali spesso contengono sostanze chimiche tossiche che, infiltrandosi nelle acque superficiali e sotterranee, possono causare la morte di specie acquatiche e la contaminazione delle risorse idriche potabili [26].

L'inquinamento del suolo rappresenta un altro problema significativo. Le discariche e i siti di smaltimento possono contaminare il suolo con sostanze chimiche tossiche, rendendo i terreni inadatti all'agricoltura. L'uso di fertilizzanti e pesticidi chimici in soluzione a questo tipo di problematiche contribuisce ulteriormente all'inquinamento del suolo e all'erosione della biodiversità [27].

Infine, non va sottovalutato il tema dell'impatto economico e sociale che l'approccio economico lineare genera. Questo modello, infatti, crea instabilità economica a lungo termine a causa della dipendenza dalle risorse naturali finite. Con l'aumento della scarsità di queste risorse, i costi di estrazione e produzione aumentano, portando a fluttuazioni dei prezzi e a forti incertezze economiche. Le comunità vicine ai siti di estrazione o smaltimento dei rifiuti sono spesso le più colpite, subendo un evidente degrado ambientale con annessa perdita di risorse.

Come viene mostrato dal grafico in *Fig. 12*, la produzione di rifiuti cresce principalmente in base a due fattori [25]. In primo luogo, in base alla crescita della popolazione, la quale comporta una maggiore domanda di beni e servizi e quindi un consumo più elevato di risorse naturali e materiali. Di conseguenza, le industrie producono più beni per soddisfare le esigenze della popolazione in crescita, generando al contempo maggiori quantità di scarti e sottoprodotti industriali. L'aumento demografico, inoltre, accresce il volume di rifiuti domestici, tra cui imballaggi, residui alimentari e prodotti di consumo obsoleti.

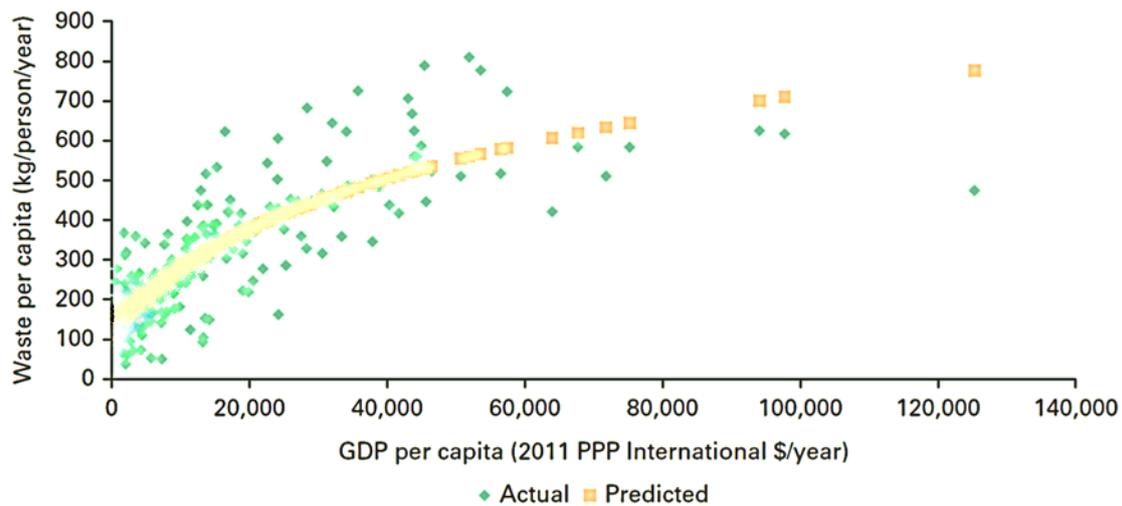


Fig.12 Modello di regressione che mette in relazione la crescita del PIL pro-capite (GDP per capita) con l'aumento di rifiuti pro-capite (Waste per capita) [25].

La produzione di rifiuti aumenta, in secondo luogo, in base alla crescita del prodotto interno lordo (PIL). Poiché la crescita economica di un Paese porta ad un aumento dei suoi tassi di produzione di rifiuti pro-capite, questa crescita si riflette sul PIL pro-capite, che misura la ricchezza media per persona all'interno di un Paese. Questo indicatore, aggiustato a parità di potere d'acquisto (PPA) per tener conto delle differenze di costo della vita e di inflazione tra i Paesi, offre una visione più accurata del benessere economico reale degli abitanti. Man mano che il PIL pro-capite aumenta, la popolazione ha accesso a un maggiore potere d'acquisto, il che si traduce in un incremento dei consumi: le persone tendono ad acquistare più beni, spesso caratterizzati da un breve ciclo di vita e da imballaggi monouso, generando così maggiori quantità di rifiuti.

La perdita di opportunità economiche costituisce un ulteriore effetto negativo dell'economia lineare. I materiali che finiscono come rifiuti rappresentano un potenziale economico non sfruttato, mentre in un'economia circolare questi materiali potrebbero essere riutilizzati, riciclati o recuperati, creando nuove attività economiche e posti di lavoro.

In sintesi, l'economia lineare non solo danneggia l'ambiente, ma provoca instabilità economica, disuguaglianze sociali, condizioni di lavoro sfavorevoli, impatti negativi sulla salute pubblica e perdita di opportunità economiche. Sotto queste ipotesi, la transizione verso un approccio circolare di modello economico risulta indispensabile.

## 2.1.2 La soluzione circolare

L'economia circolare rappresenta una risposta innovativa e sostenibile alle problematiche derivanti dall'economia lineare, mirando a ridurre l'uso delle risorse naturali, minimizzare la produzione di rifiuti e promuovere la rigenerazione dei sistemi naturali.

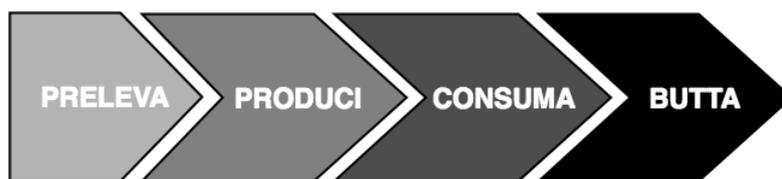


Fig.13 L'approccio tradizionale [28].

Lo schema dell'economia lineare si è dimostrato insostenibile a livello economico e ambientale per tre principali motivi: la limitatezza delle materie prime, l'inquinamento e la produzione di rifiuti. Tali limiti possono essere superati con il passaggio a un'economia circolare, un modello di business in cui ogni persona risulta un protagonista fondamentale per garantire il corretto funzionamento del sistema. Dal progettista al produttore, fino al consumatore, tutti hanno un ruolo importante e interconnesso agli altri. È quindi necessario conoscere il proprio compito e svolgerlo al meglio affinché la circolarità del flusso non venga interrotta [28].

Unendo sviluppo economico e tutela ambientale, l'economia circolare minimizza il prelievo di risorse dall'ambiente naturale e riduce l'immissione di rifiuti, con l'obiettivo finale di chiudere il ciclo produttivo, generando valore e mitigando i rischi per l'ambiente. Questo modello mira a eliminare gli sprechi e gli scarti dei processi produttivi imitando i sistemi viventi dell'ecosistema, all'interno del quale i nutrienti vengono utilizzati in modo efficiente e poi reimmessi nel ciclo. È quindi necessario il passaggio a una visione d'insieme delle filiere tale da consentire di riprogrammare le attuali modalità di progettazione e di gestione dei prodotti, a partire dalle materie prime e dalle risorse energetiche [29].



*Fig.14 L'approccio circolare in una delle sue rappresentazioni grafiche [28].*

### **Materie prime**

È fondamentale che le risorse utilizzate, siano esse materiali o energetiche, provengano il più possibile da fonti rinnovabili, in quanto l'estrazione e l'utilizzo di materiale proveniente da fonti esauribili comporta, come detto, significativi danni ambientali.

Le materie prime non rinnovabili dovrebbero essere sostituite, in misura crescente, da materie prime secondarie, ossia materiali derivanti dal riuso o dal riciclo. L'utilizzo di materie prime secondarie non solo riduce la pressione sulle risorse naturali, ma diminuisce anche l'energia necessaria per la produzione di nuovi materiali, contribuendo così a ridurre le emissioni di gas serra e altri inquinanti. Questo approccio promuove un ciclo virtuoso in cui i materiali vengono costantemente reintegrati nel processo produttivo, riducendo al minimo gli sprechi e l'impatto ambientale complessivo.

### **Progettazione**

La progettazione costituisce uno dei passi fondamentali dell'economia circolare. Fin dall'inizio, i prodotti devono essere concepiti secondo logiche di versatilità e adattabilità per allungarne il più possibile la vita utile. Questo approccio implica che i prodotti siano progettati in modo tale da poter

essere facilmente riparati, aggiornati o riconfigurati, riducendo così la necessità di sostituirli frequentemente.

Un elemento chiave nella progettazione circolare è la scelta dei materiali. Deve essere chiaro fin dal principio l'impiego futuro che potrà essere fatto dei materiali di cui il prodotto è costituito. È essenziale privilegiare materiali che possano essere riusati o riciclati, minimizzando l'uso di materiali non riciclabili o tossici. Questo non solo facilita il riciclo a fine vita del prodotto, ma riduce anche l'impatto ambientale durante la fase di produzione.

In questo senso, degli ottimi materiali che possono essere adoperati in un'ottica di economia circolare sono le bioplastiche, derivate da risorse rinnovabili come amido di mais, canna da zucchero o alghe; sono compostabili e biodegradabili ed offrono un'alternativa sostenibile alle plastiche tradizionali a base di petrolio. Acciaio inossidabile e alluminio, invece, sono materiali che permettono di essere riutilizzati infinite volte senza perdere le loro proprietà, quindi facilmente riciclabili. Tra i materiali riciclabili spiccano anche il legno, il vetro, alcune tipologie di plastiche, i tessuti, la carta ed il cartone [30].

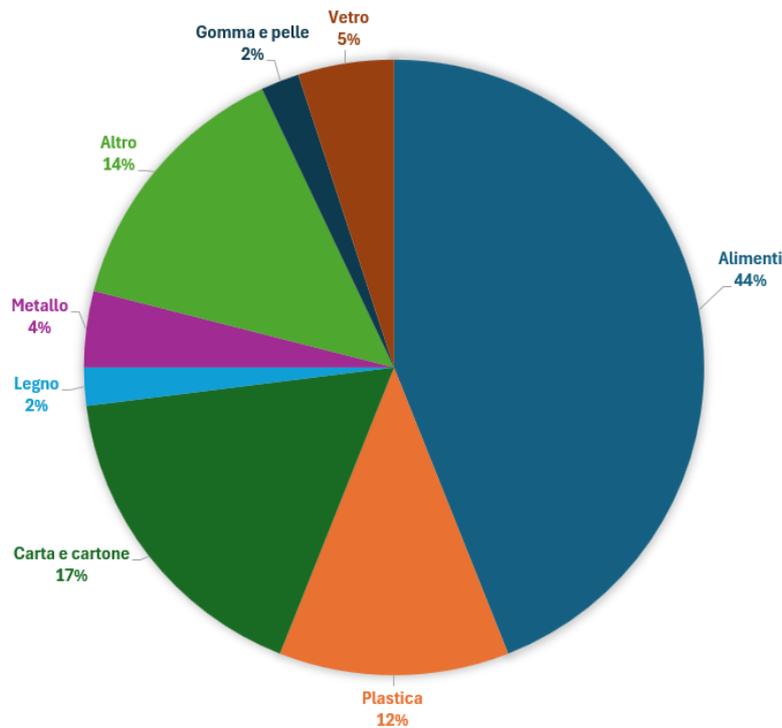


Fig.15 Composizione globale dei rifiuti per tipologia di materiale [25].

## **Produzione e fabbricazione**

Durante la fabbricazione del prodotto, è essenziale mantenere alti standard di sostenibilità ed efficienza. Un processo produttivo efficiente non solo riduce i costi operativi, ma permette anche il risparmio di significative quantità di energia e la diminuzione delle emissioni inquinanti. Per raggiungere questi obiettivi, i comparti produttivi devono essere riqualificati verso modelli più efficienti, adottando tecnologie avanzate e pratiche operative sostenibili.

La riqualificazione dei comparti produttivi implica l'implementazione di soluzioni innovative che migliorano l'efficienza energetica [31], come l'uso di macchinari a basso consumo energetico, l'adozione di tecnologie di automazione e controllo avanzate, e l'ottimizzazione dei processi produttivi per ridurre gli sprechi. Inoltre, l'integrazione di fonti di energia rinnovabile, come il solare e l'eolico, nei processi di produzione può contribuire a ridurre ulteriormente l'impatto ambientale.

Gli stessi metodi di lavorazione devono essere rivisti con l'obiettivo di ridurre l'intensità energetica, ovvero la quantità di energia necessaria per produrre un'unità di output. Ciò si può ottenere attraverso strategie quali una miglior gestione delle risorse, l'adozione di pratiche di produzione *lean* per minimizzare gli sprechi e l'implementazione di tecniche di produzione additiva, che riducono la quantità di materiale necessario per la produzione di componenti.

## **Distribuzione**

Nel contesto dell'economia circolare si richiede un cambio di schema significativo anche nel settore della distribuzione, passando dal concetto tradizionale di "prodotto" a quello innovativo di "servizio". Grazie allo sviluppo delle tecnologie digitali e alla crescente connettività, è possibile rivoluzionare il modo in cui domanda e offerta si incontrano sul mercato.

In questo nuovo approccio, un'azienda non vende più il prodotto fisico al consumatore finale, bensì offre un servizio che soddisfa la stessa necessità o esigenza. A titolo esemplificativo, si può considerare un'azienda di elettrodomestici che, anziché vendere una lavatrice, potrebbe offrire un servizio di "lavaggio a domicilio", garantendo in questo modo al consumatore l'accesso a un'apparecchiatura funzionante senza la necessità di possederla fisicamente.

Il modello in questione comporta diversi vantaggi sia per le aziende che per i consumatori. Da un lato, le aziende riducono i costi legati alla produzione e alla gestione del ciclo di vita del prodotto, poiché mantengono la proprietà del bene e ne gestiscono la manutenzione e il riciclo. Dall'altro, i consumatori beneficiano di un accesso più conveniente e flessibile ai beni e ai servizi, senza dover affrontare l'onere dell'acquisto e della gestione.



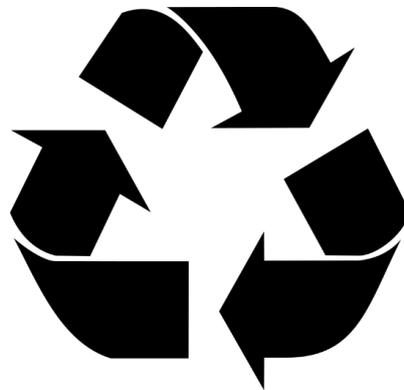
*Fig.16 L'adozione di veicoli elettrici consente l'orientamento verso modelli di servizio che riducono l'impatto ambientale della mobilità urbana [32].*

### **Consumo, uso, riutilizzo, riparazione**

Nella transizione verso un nuovo modello economico, il consumatore riveste un ruolo fondamentale nel promuovere pratiche di consumo più sostenibili e circolari. Attualmente, la nostra cultura del consumo spesso ci porta a sostituire gli oggetti quando sono rotti o diventati obsoleti, contribuendo così all'aumento dei rifiuti e all'impoverimento delle risorse naturali. Tuttavia, secondo il sistema dell'economia circolare, è essenziale che i consumatori imparino a valorizzare la durata e la riparabilità dei prodotti. Questo comporta un cambio di mentalità verso l'incremento della manutenzione e della riparazione, anziché la sostituzione sistematica degli oggetti. Introdurre nuove figure professionali, specializzate nella riparazione e nel riuso dei prodotti, può favorire questo cambiamento, offrendo servizi di qualità e incentivando la circolarità dell'economia [33]. Inoltre, la condivisione dei prodotti tra più utenti rappresenta un'opportunità

significativa per ridurre i costi e l'impatto ambientale. La condivisione non solo consente di utilizzare più efficientemente le risorse esistenti, ma riduce anche il numero di prodotti necessari, promuovendo così uno stile di vita più sostenibile e solidale.

Affinché i consumatori riescano a distinguere i prodotti “circolari” da quelli tradizionali, è necessario introdurre etichette chiare e certificazioni di circolarità (*Fig.17*). Questi strumenti forniscono trasparenza sui processi produttivi, sui materiali utilizzati e sulla gestione del ciclo di vita del prodotto, consentendo ai consumatori di fare scelte consapevoli e sostenibili.



*Fig.17 Simbolo internazionale che indica il riciclo dei rifiuti [34].*

## **Raccolta**

Nell'ambito dell'economia circolare le città assumono un ruolo fondamentale, trasformandosi in vere e proprie miniere di risorse preziose. La raccolta dei beni giunti a fine vita diventa un processo di estrazione fondamentale per alimentare la circolarità nella produzione e nel consumo, riducendo la dipendenza dalle materie prime e mitigando l'impatto ambientale derivante dall'estrazione e dalla lavorazione di nuove risorse.

Per garantire il successo di questo processo, è essenziale massimizzare la raccolta differenziata, sia per i rifiuti urbani che per quelli industriali. La differenziazione accurata dei materiali consente di recuperare una vasta gamma di risorse, che altrimenti verrebbero smaltite come rifiuti. Inoltre, il miglioramento della qualità della raccolta assume un ruolo primario, poiché risulta necessario garantire che i materiali raccolti siano privi di

contaminazioni e di buona qualità, in modo da facilitare il successivo processo di riciclo e riutilizzo.

### **Riciclo e rifiuti residui**

Il riciclo rappresenta un pilastro fondamentale in cui il ciclo di vita dei materiali si chiude, trasformando i rifiuti in materia prima secondaria pronta per essere reinserita nel processo produttivo.

È importante sottolineare che il riciclo è strettamente interconnesso con gli altri step del ciclo di vita dei prodotti, in particolare con la progettazione. Una progettazione attenta e orientata alla circolarità, infatti, può facilitare e ottimizzare il processo di riciclo. In altre parole, se fin dall'inizio della vita del prodotto è chiaro come questo verrà gestito al termine del suo utilizzo, il riciclo diventa più semplice ed efficiente.

Promuovere la consapevolezza e l'educazione dei consumatori sul riciclo corretto e sostenere l'adozione di prodotti riciclabili e compostabili sono ulteriori passi importanti per favorire un'economia circolare. L'implementazione di politiche pubbliche mirate, incentivi finanziari e normative più stringenti possono risultare determinanti nel favorire la transizione verso un'economia più circolare e sostenibile.

Sebbene il riciclo giochi un ruolo fondamentale, è importante comprendere che esistono rifiuti che non possono essere completamente reintegrati nel processo produttivo come materia prima secondaria. In presenza di questi rifiuti residui, è essenziale adottare strategie di smaltimento che rispettino i principi della gerarchia dei rifiuti<sup>4</sup>. Tra queste emerge la cosiddetta termovalorizzazione, pratica che consiste nel trattare i rifiuti attraverso tecnologie capaci di recuperare il loro contenuto energetico, riducendo il volume dei rifiuti destinati alla discarica e generando energia sotto forma di elettricità o calore [35].

---

<sup>4</sup> La gerarchia dei rifiuti è un ordine di priorità contenuto nella direttiva quadro sui rifiuti (direttiva 2008/98/EC) che stabilisce normative e politiche per il trattamento dei rifiuti nell'Unione Europea. Essa definisce una serie di modalità da privilegiare per gestire i rifiuti con il minor impatto ambientale possibile. Le priorità evidenziate nella direttiva sono: prevenzione, preparazione per il riutilizzo, riciclo, recupero di altro tipo (come il recupero di energia) e smaltimento.

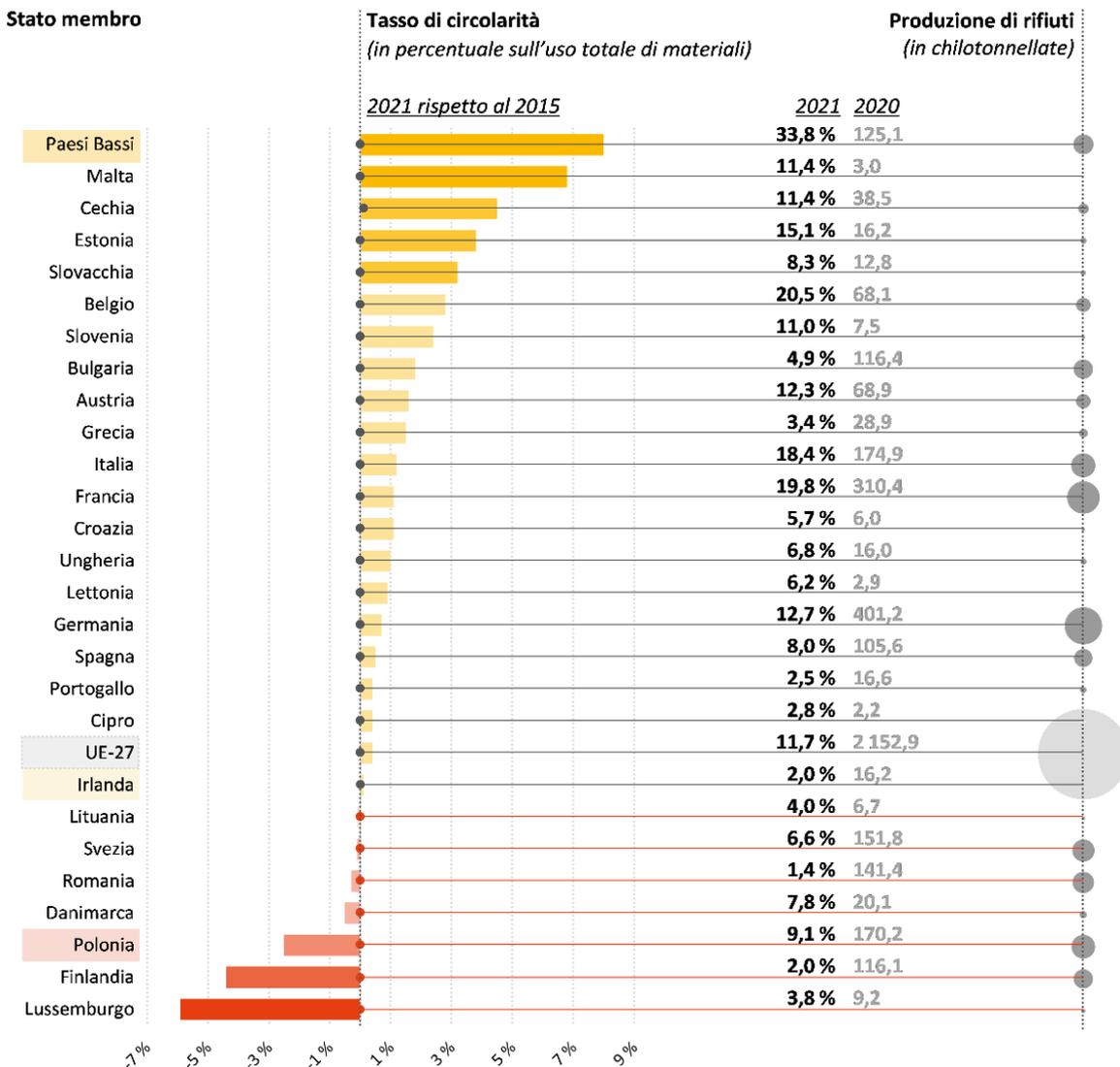


Fig.18 Progressi degli Stati dell'UE verso l'economia circolare nel periodo 2015-2021 [36].

Secondo il rapporto del 2023 della Corte dei conti Europea, l'UE ha fatto progressi nell'implementazione dell'economia circolare, malgrado esistano ancora notevoli disparità tra i vari Stati membri. Sebbene la Commissione Europea abbia sviluppato politiche per promuovere il riciclo, la riduzione dei rifiuti e l'uso efficiente delle risorse, molti Stati non sono ancora sulla buona strada per raggiungere gli obiettivi fissati, come il riciclo del 65% dei rifiuti urbani entro il 2035 [36]. La Fig.18 illustra i progressi compiuti da ciascuno Stato membro tra il 2015 e il 2021 e la quantità di rifiuti prodotti. Sette Stati membri hanno fatto passi indietro in questo periodo.

A livello globale, l'adozione dell'economia circolare varia considerevolmente. Paesi come la Cina e Giappone hanno iniziato a incorporare principi di economia circolare nelle loro politiche industriali, mentre altre nazioni, più in via di sviluppo, stanno ancora muovendo i primi passi, a causa limitate risorse finanziarie e tecnologiche.

### 2.1.3 *Cradle to cradle*

Il *Cradle to Cradle* (tr. “dalla culla alla culla”), chiamato anche design rigenerativo e abbreviato in C2C, è un approccio introdotto dall'architetto William McDonough e dal chimico Michael Braungart<sup>5</sup> che ripensa il modo in cui i materiali vengono prodotti, con l'obiettivo di eliminare gli sprechi sviluppando prodotti finiti che possano essere completamente disassemblati, riutilizzati o biodegradati al termine della loro vita utile, creando un ciclo rigenerativo [37]. Emulando i processi ciclici della natura, secondo cui i rifiuti di un organismo naturale diventano una risorsa per un altro, il C2C ridefinisce il rapporto tra uomo e ambiente, creando un ecosistema autosufficiente. Questo approccio costituisce un'estensione pratica ed applicata dell'economia circolare e si contrappone al modello *Cradle to Grave* (tr. “dalla culla alla tomba”). Quest'ultimo viene comunemente accostato all'economia lineare in quanto non prevede l'inserimento di alcun tipo di circolarità all'interno del sistema. In altre parole, non permette il riutilizzo dei materiali e il loro reinserimento nella supply chain.

In questo contesto di circolarità, l'analisi del ciclo di vita di un prodotto, chiamata *Life Cycle Assessment* o LCA, risulta fondamentale, poiché si tratta di una metodologia analitica che permette di valutare numericamente gli impatti ambientali di un dato prodotto durante tutte le fasi del suo ciclo di vita. L'analisi LCA si basa su quattro principali fasi: nella prima fase si stabiliscono gli scopi dell'analisi e i limiti del sistema da studiare; successivamente, si raccolgono dati sugli input e sugli output dei materiali per ciascuna fase del ciclo di vita del prodotto, ovvero si esegue un'analisi dell'inventario; nella terza fase vengono quantificati gli effetti

---

<sup>5</sup> McDonough e Braungart nel 2002 hanno introdotto la dicitura “dalla culla alla culla” nel loro libro intitolato *Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things*.

ambientali associati agli input e agli output identificati nella fase precedente; nell'ultima fase vengono analizzati i dati raccolti e gli impatti per individuare eventuali opportunità di miglioramento. Integrando l'LCA con i principi del C2C, è possibile guidare le decisioni di progettazione e produzione per ridurre al massimo delle possibilità l'impatto ambientale. Secondo alcune classificazioni, l'approccio Cradle to Cradle si basa su tre principi fondamentali [37]: *Waste Equals Food*, *Use Current Solar Income* e *Celebrate Diversity*.

Il principio *Waste Equals Food* immagina un mondo in cui i rifiuti sono una risorsa. Nei cicli naturali, i rifiuti di un organismo diventano nutrimento per un altro, perpetuando un ciclo di riutilizzo e rigenerazione.



Fig.19 Le quattro principali fasi dell'analisi LCA [38].

Il C2C applica questo concetto ai materiali e ai prodotti, spingendo a creare oggetti che possano essere riciclati biologicamente o tecnicamente. Il principio *Use Current Solar Income*, invece, sottolinea l'importanza di sfruttare le fonti di energia rinnovabili, promuovendo l'uso diretto di queste fonti all'interno dei processi produttivi, oltre alla progettazione di prodotti efficienti da un punto di vista energetico. Infine, il principio *Celebrate Diversity* riconosce il valore della diversità nei materiali, nei processi e nelle culture, incoraggiando soluzioni appropriate a livello locale e adattabili a contesti diversi.

## 2.2 La circolarità nel packaging

Tra i principali obiettivi in tema di economia circolare spiccano quelli nell'ambito alimentare, in particolare l'uso di modelli predittivi per prevenire lo spreco di cibi e promuovere la gestione circolare degli imballaggi. Ogni anno l'economia mondiale consuma più di 100 miliardi di tonnellate di materie prime ma ne riutilizza solamente il 9% [39]: rendere circolare l'utilizzo degli imballaggi alimentari è sicuramente tra i migliori metodi per aumentare la percentuale di riutilizzo delle materie prime.

Secondo un recente sondaggio, otto italiani su dieci ritengono importante ridurre l'imballaggio dei prodotti [40]. Tuttavia, per i cittadini è fondamentale che gli imballaggi riciclati mantengano la sicurezza nel contatto con gli alimenti e che siano effettivamente riciclabili. Questo indica un forte impegno verso la sostenibilità ambientale da parte dei consumatori.

Come detto, alla base dell'economia circolare vi è il principio secondo cui un materiale da rifiuto è in grado di diventare una risorsa in grado di generare un nuovo prodotto. L'Agenzia Europea dell'Ambiente ha evidenziato che gli imballaggi rappresentano una percentuale consistente dei rifiuti generati, contribuendo significativamente al volume complessivo dei rifiuti prodotti, in quanto i materiali di imballaggio sono concepiti con l'unico scopo di essere gettati dopo aver svolto la loro funzione di far arrivare un prodotto integro e ben conservato nelle mani del consumatore. Tuttavia, una volta gettato, il packaging può essere introdotto in un impianto di riciclo in grado di trasformare il rifiuto in un nuovo materiale da utilizzare per un altro tipo di prodotto. Questo è l'obiettivo che ultimamente sempre più aziende, multinazionali e no, si stanno prefissando.

Da un sondaggio effettuato dalla Royal Society of Arts a giugno 2022 emerge un interesse significativo da parte degli intervistati verso le politiche di riutilizzo dei packaging alimentari: il 67% ha affermato di voler ridurre la quantità di imballaggi monouso dei prodotti alimentari [40]. È stato chiesto anche quali possano essere le barriere culturali che disincentivano l'opzione del riuso: il 38% degli intervistati ha espresso preoccupazione per il fatto che l'imballaggio potrebbe non essere pulito, il 31% teme che l'approccio potrebbe costare di più e il 27% si è detto preoccupato di dover trasportare o conservare l'imballaggio fino alla restituzione.

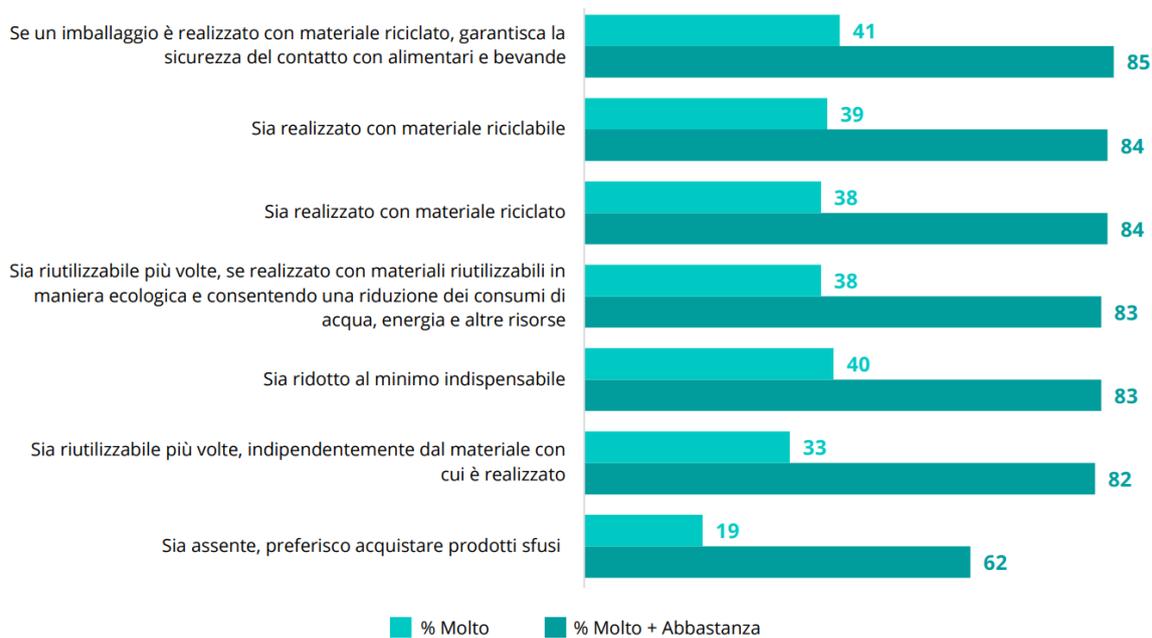


Fig.20 Importanza attribuita all'imballaggio di un prodotto (dati in percentuale) [40].

## 2.2.1 Il caso della plastica

Il packaging alimentare si basa sempre di più sull'uso della plastica come materiale principale per gli imballaggi grazie alle sue caratteristiche chimico-fisiche uniche e grazie alla sua applicabilità in numerose applicazioni [41]. Nello specifico, i contenitori alimentari sono costituiti da un film plastico che viene prodotto miscelando diversi materiali fino ad ottenere il composto perfetto per il prodotto oggetto dell'imballaggio. Il film plastico infatti detiene la maggior parte delle proprietà desiderabili per un buon packaging alimentare, come la capacità di proteggere il contenuto da contaminazioni esterne, la trasparenza, la flessibilità e la resistenza [42]. Questi film vengono prodotti mediante estrusione utilizzando materiali polimerici, ma non rappresentano la prima fase del ciclo di vita del packaging alimentare. Il ciclo di vita della plastica ha inizio con l'estrazione delle materie prime, principalmente petrolio e gas naturale. In particolare, questi materiali vengono estratti dal sottosuolo e trasportati alle raffinerie, nei quali vengono processati per ottenere etilene e propilene, ossia i monomeri fondamentali per la produzione dei polimeri.

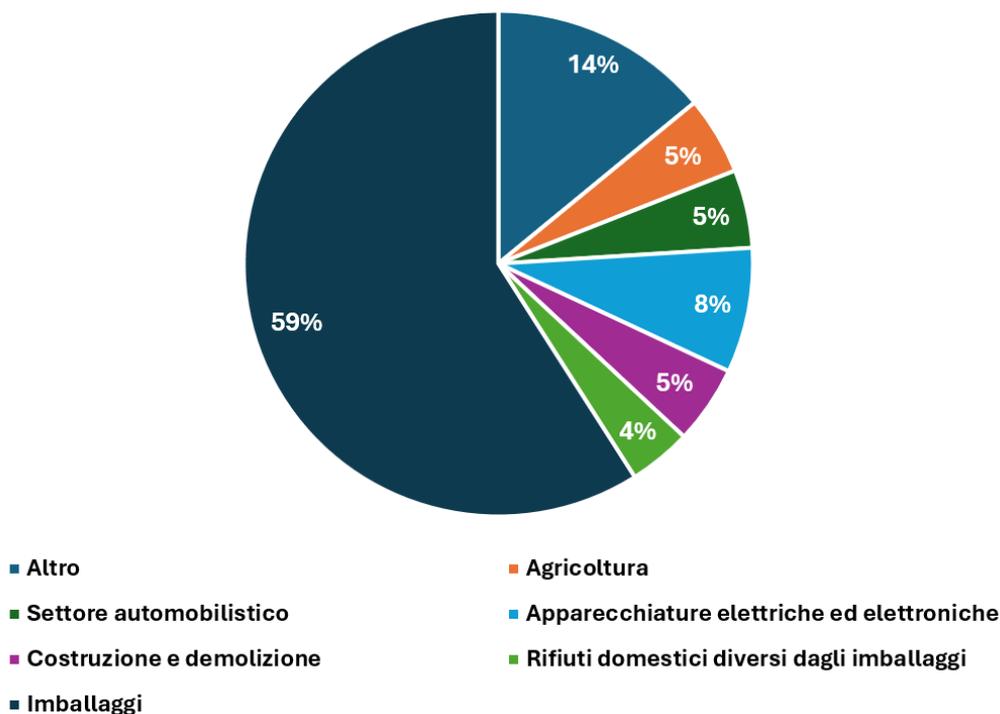


Fig.21 Rifiuti di plastica prodotti nell'UE per categoria (2021) [42]

La raffinazione è un processo complesso che comporta la separazione dei componenti del petrolio greggio attraverso il riscaldamento e altre tecniche di tipo chimico. Una volta ottenuti i monomeri, essi vengono polimerizzati per creare diversi tipi di plastica, come polietilene, polipropilene, PVC e altri. Negli impianti chimici i monomeri vengono fatti reagire per formare lunghe catene polimeriche, da cui si ottengono delle resine plastiche che possono essere ulteriormente processate. La resina plastica viene successivamente trasformata in prodotti finiti attraverso vari processi di lavorazione come l'estrusione, lo stampaggio a iniezione, il soffiaggio e la termoformatura. Nel caso degli imballaggi alimentari, è l'operazione di estrusione che permette la trasformazione della plastica in film sottili. Questi film possono essere laminati e combinati con altri materiali per migliorare le proprietà "barriera" dei contenitori, ovvero per aumentare la capacità di proteggere il cibo da contaminazioni esterne [43].

Una volta utilizzati, gli imballaggi in plastica entrano nella fase di post-consumo, in cui possono essere smaltiti in diversi modi. L'adozione della logistica inversa permette di minimizzare la fase di smaltimento e di massimizzare, invece, quella del riutilizzo dei materiali plastici.



Fig.22 Estrusione di un film plastico [44].

## 2.2.2 La logistica inversa

La logistica inversa (*reverse logistic*) consiste in un flusso a ritroso di materie prime, semilavorati e prodotti finiti, i quali ritornano dal cliente al produttore iniziale o a un soggetto terzo adibito al recupero; questo dovrà provvedere alla raccolta nella maniera più efficiente e al minor costo possibile. La logistica inversa rappresenta chiaramente una fase fondamentale in termini di economia circolare dei packaging alimentari. Un corretto studio di questa fase permette l'effettiva minimizzazione degli sprechi di imballaggi, permettendo di ottimizzare l'intero processo di produzione. Le principali attività che vengono effettuate in ambito di logistica inversa sono relative alle fasi di raccolta, ispezione, smistamento e assegnazione di nuove destinazioni ai prodotti; questi ultimi potranno essere riutilizzati, riparati, rigenerati o riciclati a seconda della situazione che si presenta.

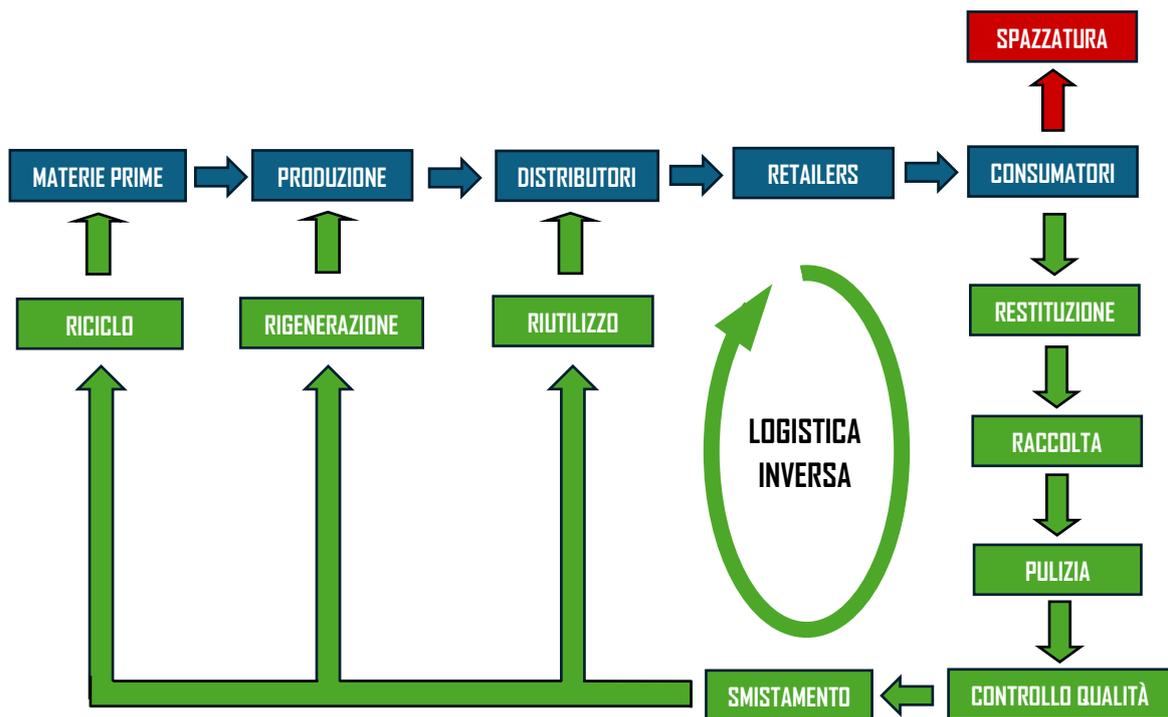


Fig.23 Diagramma di flusso sui modelli economici: in blu il modello lineare, il quale si conclude con lo smaltimento; in verde il modello circolare, che si ricongiunge alle prime fasi del modello lineare.

Nella fase di restituzione i consumatori consegnano il packaging utilizzato a colui che si occupa della reintegrazione dello stesso nel sistema. Nel caso del packaging alimentare questo può avvenire in svariati modi. Tra le metodologie più comuni vi è quella in cui l'utente finale restituisce il packaging in un semplice punto di raccolta presente in un supermercato o in una generica attività commerciale. Talvolta sono presenti particolari convenzioni con i rivenditori, i quali offrono degli incentivi ai consumatori che prendono parte a questa attività di restituzione degli imballaggi [45]. Alternativamente, le aziende stesse offrono dei servizi di ritiro a domicilio dei packaging, grazie ai quali i consumatori possono lasciare i materiali riciclabili fuori dalla loro abitazione secondo un calendario prestabilito. Sono altamente utilizzate, inoltre, le cosiddette isole ecologiche. Queste rappresentano dei veri e propri centri di raccolta differenziata in cui sono presenti delle macchine raccoglitrice automatiche, nelle quali i cittadini possono portare il packaging alimentare per il riciclo.

Per le fasi di restituzione e raccolta sono indispensabili delle reti di trasporto efficienti. La riconsegna presso i centri di lavorazione dovrebbe

avvenire attraverso: veicoli specializzati per il trasporto di materiali riciclabili, dotati di compartimenti separati per diversi tipi di packaging; sistemi di tracciamento per monitorare il flusso dei materiali raccolti, assicurando che arrivino ai centri di lavorazione in modo tempestivo; registratori digitali dettagliati delle quantità e delle tipologie di packaging raccolto, per migliorare la trasparenza e l'efficienza del processo.

La fase di pulizia del packaging alimentare è un passaggio essenziale nella logistica inversa, in quanto garantisce che i materiali siano adeguatamente preparati per il riciclo o per altre forme di riutilizzo. Questa fase consiste principalmente nel lavaggio del contenitore al fine di renderlo libero da residui di cibo o da altre impurità che potrebbero contaminarlo. In *Fig.24* è rappresentata una lavatrice automatica che permette di pulire ed igienizzare grandi quantità di pallet e contenitori. Questa soluzione è largamente preferibile rispetto alla pulizia manuale, in quanto la sanificazione di packaging in plastica richiede metodi di lavaggio specializzati non ottenibili manualmente. Ciò garantisce che i microrganismi vengano rimossi quasi completamente senza utilizzare sostanze chimiche aggressive, come la candeggina, che potrebbero contaminare il cibo.

Tra la fase di pulizia del contenitore e quella del suo reinserimento nel ciclo vi è un processo indispensabile, senza il quale i packaging non potrebbero essere smistati, ovvero il controllo qualità degli imballaggi.



*Fig.24 Lavatrice automatica [46].*

Nella fase di controllo qualità vengono analizzati sostanzialmente due aspetti riguardanti il packaging: la presenza di contaminazioni al suo interno e l'integrità dell'imballaggio.

Le tecniche per la rilevazione delle contaminazioni sono fondamentali per assicurare che il packaging alimentare non contenga residui che possano compromettere la qualità del riciclo o rappresentare un rischio per la salute dei consumatori. Una delle tecniche più comuni in questo contesto è il "test ATP" [47]. L'ATP, abbreviazione di Adenosina Trifosfato, è una molecola presente in tutte le cellule viventi. Di conseguenza, la rilevazione di ATP all'interno dei contenitori indica la presenza di materiale biologico, come batteri, lieviti, muffe e residui di cibo. Entrando più nel dettaglio, il test si basa sulla bioluminescenza, un processo di emissione di luce che si verifica nel momento in cui l'ATP reagisce con l'enzima luciferasi. Il processo inizia con la raccolta del campione dalla superficie del packaging utilizzando un tampone speciale che contiene un reagente contenente l'enzima luciferasi. Dopodiché, il tampone viene inserito in un dispositivo portatile chiamato luminometro, in cui l'ATP presente nel campione reagisce con la luciferasi. La reazione produce luce, la cui intensità è direttamente proporzionale alla quantità di ATP presente nel campione. Il luminometro misura l'intensità della luce e fornisce una lettura numerica che rappresenta i livelli di ATP: maggiore è il valore riportato, maggiore è la quantità di contaminazione biologica presente.



*Fig.25 Step procedurali per il test dell'ATP [48].*

Tra le altre metodologie utilizzate per verificare la presenza di contaminazioni nei packaging vi sono: analisi di tipo microbiologico per studiare la presenza di microrganismi patogeni [47]; la spettroscopia a infrarossi (FTIR), la quale permette di identificare la composizione chimica del

materiale e di rilevare contaminanti organici ed inorganici [49]; differenti tecniche basate sull' [50]. L'elaborazione delle immagini dei contenitori post-pulizia per verificare la presenza di contaminazioni costituisce l'argomento di ricerca di questa tesi, il quale verrà trattato nel capitolo successivo.

Per quanto concerne, invece, le tecniche per verificare l'integrità dell'imballaggio, queste sono essenziali per assicurare che i materiali riciclati mantengano le loro proprietà strutturali e che siano idonei per il riutilizzo. Una delle tecniche principali è il test di resistenza meccanica, che valuta la capacità del packaging di resistere a vari stress come compressione, trazione e urti. Tra i test di resistenza meccanica più comuni in ambito di packaging alimentare vi è il test T-peel (*Fig.26*) [51]. Questo permette di valutare la resistenza dei legami adesivi che uniscono i bordi o i sigilli di confezioni in plastica. Nel corso di un test di distacco a T, entrambe le estremità libere del campione vengono fissate e sottoposte a trazione. In questo modo è possibile misurare la forza necessaria per separare i materiali uniti dall'adesivo. Questo test è fondamentale per garantire che l'imballaggio possa proteggere adeguatamente il contenuto durante il trasporto e l'uso. L'ispezione visiva e ottica è un'ulteriore tecnica adoperata per rilevare difetti fisici come crepe, rotture o deformazioni. Questa può essere effettuata manualmente o attraverso sistemi automatizzati di visione artificiale, che permettono una valutazione più rapida ed efficiente.



*Fig.26 Test di distacco a T (T-peel) [52].*

Una volta che i prodotti sono stati ispezionati e hanno superato i controlli qualità, vengono assegnati a una nuova destinazione. Se i controlli sono stati superati senza il bisogno di dover eseguire ulteriori lavorazioni significative, allora il packaging viene reinserito direttamente nel ciclo restituendolo ai distributori. Invece, se il packaging non supera il controllo qualità, viene avviato il processo di riciclo. Nel riciclo, il materiale del packaging viene raccolto, suddiviso per tipologia (plastica, vetro, metallo, carta) e sottoposto a trattamenti che ne permettono la trasformazione in materie prime secondarie. Queste materie prime possono poi essere utilizzate per produrre nuovi prodotti, riducendo la necessità di estrarre e lavorare nuove risorse. Nel caso della plastica, questa può essere triturrata, fusa e riformata in nuovi contenitori o altri prodotti plastici.

Esiste anche un'opzione intermedia, quella della rigenerazione (*remanufacturing*) [53]. Si tratta di un processo più complesso che comporta lo smontaggio del packaging per recuperare i componenti utilizzabili, i quali vengono poi riasssemblati con nuove parti per creare un prodotto che sia funzionalmente equivalente a uno nuovo. Questo processo è particolarmente utile per packaging più complessi o di alto valore.

Inoltre, nel caso in cui il packaging presenti difetti minori che possono essere corretti, viene avviato un processo di riparazione. Questo potrebbe includere la sostituzione di parti danneggiate, la riparazione di guarnizioni o la correzione di piccoli difetti estetici. La riparazione è una strategia efficace per estendere la vita utile del packaging senza doverlo completamente smantellare o riciclare. Ad esempio, un contenitore in plastica avente il coperchio danneggiato può usufruire di una semplice sostituzione di quest'ultimo con uno di ricambio per essere nuovamente utilizzabile.

La logistica inversa rappresenta una risorsa fondamentale all'interno della filiera della plastica, offrendo alle aziende l'opportunità di differenziarsi sul mercato. Uno dei principali benefici è il miglioramento dell'immagine sociale aziendale [54]. Infatti, implementando pratiche di logistica inversa le aziende dimostrano un impegno concreto verso la sostenibilità ambientale e la responsabilità sociale dell'impresa. Questo può aumentare la fiducia e la soddisfazione dei consumatori, generando un impatto positivo sull'immagine e sulla reputazione dell'azienda. Consentendo ai clienti di restituire i prodotti in modo efficiente e di partecipare attivamente al processo di riciclo, le aziende migliorano l'esperienza dei consumatori.

## 2.3 Diversificazione dei materiali

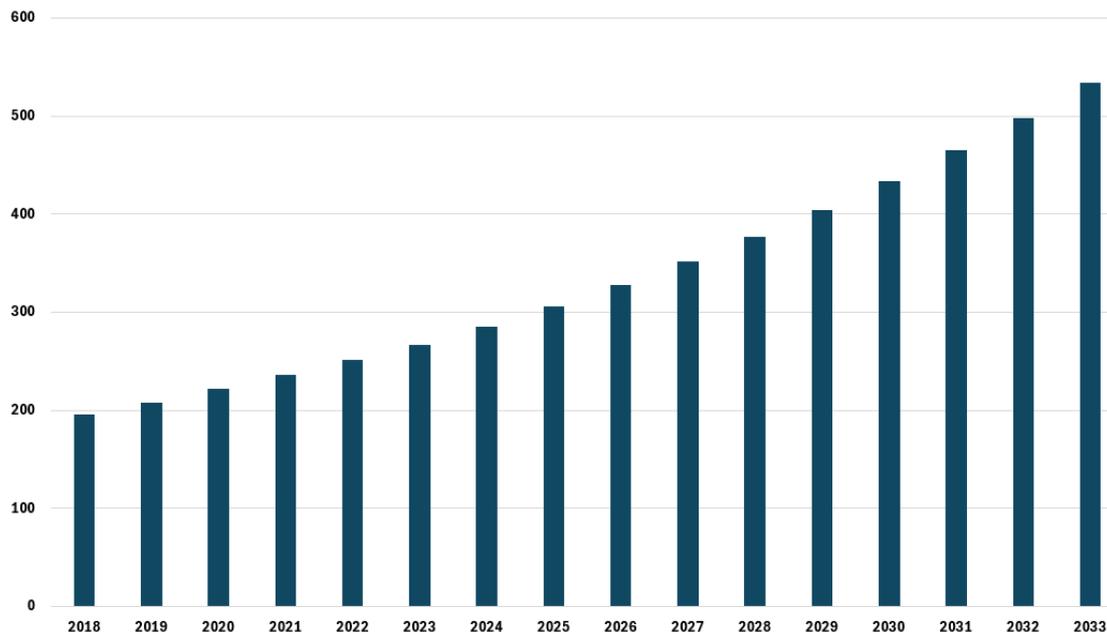


Fig.26 Mercato globale dei packaging riutilizzabili (dati in milioni di dollari) [55]

Come si può dedurre dal grafico in Fig.26, il mercato mondiale degli imballaggi è in forte crescita, specialmente per quanto riguarda i packaging riciclabili [55]. È, dunque, nell'interesse di ogni azienda che fa uso in larga scala di imballaggi ottimizzarne l'utilizzo, sia in termini di riciclabilità che di impatto ambientale. Nei precedenti paragrafi si è sottolineato come i packaging in plastica per gli alimenti siano tanto versatili quanto dannosi per l'ambiente circostante. Il riutilizzo degli imballaggi è una naturale e consequenziale soluzione a questa problematica, ma non è l'unica. Infatti, parallelamente all'attuazione di un'economia circolare per il food packaging, si stanno utilizzando, ove possibile, dei materiali alternativi alla plastica, innovativi e altamente più sostenibili. È il caso delle cosiddette bioplastiche, le quali derivano da risorse biologiche rinnovabili, come colture vegetali, scarti agricoli e altre fonti rinnovabili. Questi materiali possono essere trasformati in polimeri adoperabili in diversi contesti, tra cui i packaging alimentari, mantenendo le

proprietà funzionali della plastica convenzionale. Le bioplastiche offrono, oltretutto, un vantaggio notevole in termini di Carbon Footprint<sup>6</sup> [56]. Le bioplastiche sono comunemente divise in due macrocategorie: biodegradabili e compostabili. Le prime si comportano come le plastiche fossili e devono essere riciclate insieme alle plastiche convenzionali. Quelle compostabili, invece, secondo la norma UNI/EN13432, possono essere smaltite nei rifiuti organici e trasformate in compost attraverso un processo di compostaggio industriale.

Gli studi di LCA sulle bioplastiche indicano che, sebbene queste abbiano un minore impatto in termini di emissioni di gas serra rispetto alle plastiche convenzionali, le loro prestazioni ambientali possono variare notevolmente in base alla materia prima utilizzata e ai processi di produzione. Ad esempio, le bioplastiche derivate dal mais possono presentare un'impronta idrica significativa, mentre quelle da rifiuti organici possono risultare più sostenibili.

D'altra parte, le bioplastiche sono generalmente due o tre volte più costose delle principali plastiche convenzionali come PE o PET [57]. Questo incremento dei costi è dovuto alle basse rese produttive e ai processi di produzione ancora relativamente costosi. Inoltre, la capacità produttiva limitata influisce negativamente sulle economie di scala, mantenendo alti i costi per unità. Questo svantaggio dovrebbe ridursi nel tempo, man mano che la tecnologia migliora e gli impianti di produzione diventano più grandi.

Tra le bioplastiche, sta guadagnando una certa popolarità l'Acido Polilattico (PLA) [58], il quale è prodotto a partire da risorse rinnovabili come il mais. Il PLA ha un'impronta di carbonio inferiore rispetto alle plastiche convenzionali, poiché la coltivazione delle piante utilizzate per la sua produzione cattura anidride carbonica. Tuttavia, il PLA richiede condizioni specifiche per essere compostato industrialmente e non si degrada facilmente nell'ambiente naturale, limitando i suoi benefici ambientali se non correttamente smaltito.

---

<sup>6</sup> La *carbon footprint* (trad. "impronta di carbonio") è una misura dell'impatto ambientale che rappresenta la quantità di gas serra emessi in modo diretto o indiretto da una persona, organizzazione, evento o prodotto.

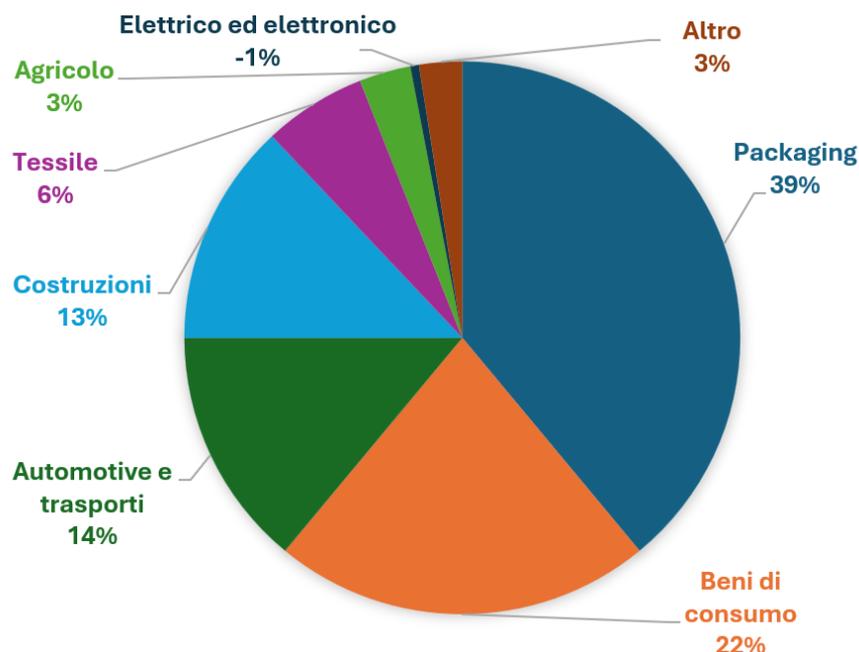


Fig.27 Produzione globale di bioplastiche nel 2021 per settori [59].

Accanto alle bioplastiche, altri materiali stanno emergendo come alternative valide alla plastica convenzionale. Il Polietilene (PE) ad alta e bassa densità (HDPE ed LDPE) e il Polipropilene (PP) vengono adoperati sotto forma di contenitori di plastica rigidi; il Polistirene espanso estruso (XPS) è utilizzato per la produzione di vassoi e vaschette; il Polietilentereftalato (PET) è utilizzato per la realizzazione di contenitori, bobine film e coperchi destinati al packaging di prodotti a lunga conservazione. Tutti queste tipologie di materiali alternativi sono già ampiamente utilizzate nel settore del food packaging grazie alle loro ottime proprietà di versatilità [60].

Nel 1988 la Society of the Plastic Industry (SPI) ha introdotto un sistema di identificazione numerica dei tipi di resine plastiche per agevolare il processo di riciclo e smaltimento dei materiali plastici. La simbologia numerica è diventata un sistema standardizzato utilizzato in tutto il mondo per classificare i diversi tipi di plastica, consentendo ai consumatori di identificarle facilmente e di separarle correttamente in fase di riciclo. I simboli sono accompagnati crescentemente da una cifra che può andare da 1 a 6, a seconda della casistica: 1 per il PETE (Polietilentereftalato), 2 per l'HDPE (Polietilene ad Alta Densità), 3 per il PVC (Polivinilcloruro), 4 per l'LDPE (Polietilene ad Alta Densità), 5 per il PP (Polipropilene) e 6 per il PS (Polistirene). Il triangolo accompagnato dal numero 7 indica altri

plastici miscelati, ossia quella plastica che non può essere riciclata ma che è destinata al contenitore della raccolta indifferenziata. I numeri che indicano i diversi tipi di plastica secondo il sistema SPI di solito si trovano all'interno di un triangolo di frecce, noto come "simbolo del riciclo".



*Fig.28 Simbologia numerica delle plastiche [61].*

Questi simboli possono essere stampati direttamente sul contenitore o su un'etichetta adesiva applicata su di esso. Tuttavia, è importante notare che la presenza del simbolo del riciclo con il numero non garantisce necessariamente che l'oggetto sia effettivamente riciclabile in tutti i sistemi di riciclo. La riciclabilità, infatti, può variare in base alla località e alle infrastrutture disponibili per il riciclo.

# Capitolo 3

## Il caso di studio

In questo capitolo ci si concentrerà sul caso di studio che è stato elemento di ricerca per questa tesi. Come anticipato nel precedente capitolo, è stato studiato un metodo di elaborazione delle immagini per rilevare la presenza di contaminazioni in determinati packaging alimentari in plastica. Dunque, prima di descrivere nel dettaglio il caso di studio analizzato, verrà spiegata, nelle sue generalità, la metodologia dell'*image processing* nell'ottica degli imballaggi alimentari. Le singole tecniche di elaborazione di immagini che sono state utilizzate verranno approfondite direttamente quando verrà esposto il metodo utilizzato.

Questa sezione si pone come un particolare approfondimento della fase di controllo qualità applicata sui contenitori in plastica, tema già accennato nello scorso capitolo in ambito di *circular economy*. Questa fase rappresenta un elemento di studio essenziale per l'economia circolare nel settore del *food packaging*, non solo per quanto concerne l'effettiva efficienza del metodo adoperato per effettuare il controllo, ma anche da un punto di vista di ottimizzazione dei tempi e dei costi della sua applicazione.

### 3.1 Elaborazione di immagini digitali

Un'immagine digitale la si può considerare come una matrice formata da una serie di elementi, i quali prendono il nome di "pixel". Ad ogni pixel è associato un valore, che può essere scalare o vettoriale a seconda dell'immagine in questione. Durante il processo di digitalizzazione, l'immagine ottenuta è quindi trasformata in un numero finito di pixel, assegnando a ciascuno un indice numerico di posizione e un valore che indica l'intensità

di colore. Pertanto, un'immagine digitale è considerata come un vettore a due dimensioni di valori che rappresentano l'intensità luminosa, ovvero come una funzione  $f(x,y)$ , dove  $f$  rappresenta la luminosità del punto  $(x,y)$ , mentre  $x$  e  $y$  rappresentano le coordinate di ciascun pixel [62].

È possibile suddividere le immagini digitalizzate in tre principali categorie. La prima categoria è data dalle immagini a scala di grigi (*greyscale*). In queste immagini, l'unica informazione contenuta nel pixel è l'intensità luminosa. Le immagini sono costituite da una gamma di grigi, comunemente composta da 256 livelli, che spazia dal bianco al nero; ad ogni pixel viene associato un numero intero positivo che indica l'intensità luminosa di quel corrispondente punto all'interno dell'immagine.



Fig.29 Un'immagine in scala di grigi [63].

La seconda categoria è data dalle immagini binarie. In questo caso ogni pixel può assumere solamente due valori, 0 o 1, i quali tipicamente corrispondono al colore bianco e al colore nero. Queste immagini vengono prodotte attraverso delle tecniche di sogliatura (*thresholding*), le quali attribuiscono un dato valore binario ad un pixel a seconda che il valore di quest'ultimo abbia superato o meno una determinata soglia prefissata.

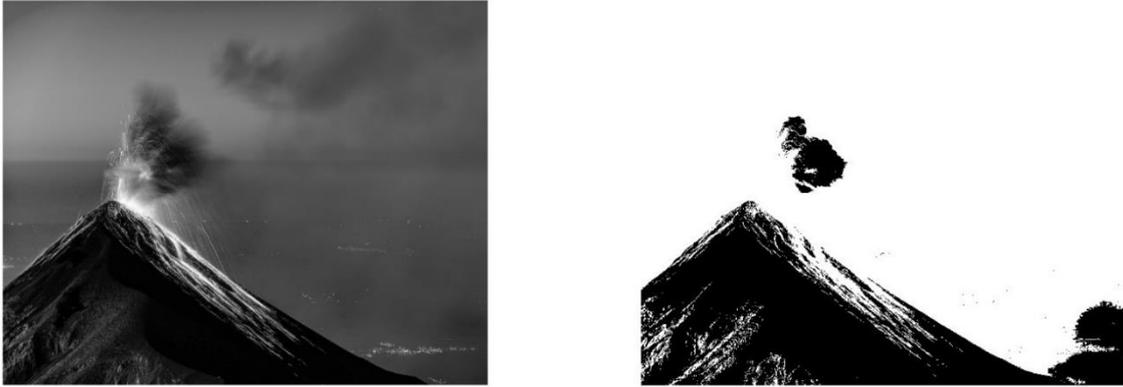


Fig.30 Immagine in scala di grigi ed immagine binarizzata (A1).

Infine, la terza categoria è rappresentata dalle cosiddette immagini multispettrali. Un'immagine multispettrale è un tipo di immagine in cui ogni pixel non è rappresentato da un singolo valore, cioè da uno scalare, bensì da un vettore di valori. Ogni componente del vettore rappresenta l'informazione corrispondente ad una specifica banda spettrale. Ad esempio, nel caso delle immagini RGB ogni pixel è rappresentato da un vettore di tre componenti, che corrispondono ai colori fondamentali rosso, verde e blu; nelle immagini HSV ogni pixel è sempre rappresentato da un vettore di tre componenti, ma in questo caso esse descrivono la tonalità del colore (*Hue*), la sua saturazione (*Saturation*) e la sua luminosità (*Value*).

L'elaborazione digitale delle immagini è una disciplina che si avvale di una serie di algoritmi per modificare delle immagini ricevute in input. Tali algoritmi utilizzano trasformazioni numeriche sui pixel delle immagini per produrre determinate immagini in output, differentemente da quanto accade con l'analisi numerica delle immagini, il cui output consiste in misurazioni relative all'immagine stessa.

Modificare un'immagine implica variare i valori dei pixel attraverso l'ausilio di operatori, che possiamo principalmente suddividere in due categorie: gli operatori puntuali e gli operatori spaziali [64].

Gli operatori puntuali eseguono elaborazioni semplici che consistono nel variare la scala di intensità pixel per pixel e possono essere descritti mediante una funzione di mapping del tipo  $s = M(r)$ , dove  $r$  e  $s$  sono rispettivamente il valore iniziale e quello finale del pixel considerato. Le operazioni puntuali vengono eseguite sulla base dell'analisi dei livelli di

grigio nell'immagine e generalmente le trasformazioni sono orientate al miglioramento della qualità dell'immagine (*image enhancement*). Lo strumento principale utilizzato è l'istogramma dell'immagine digitale, ovvero la rappresentazione grafica della distribuzione tonale dell'immagine. Questo grafico presenta nelle ascisse l'intensità dei pixel e nelle ordinate il numero di pixel che posseggono quel determinato valore di intensità. Ad esempio, un'immagine *greyscale* ha un istogramma con 256 valori sulle ascisse, mentre un'immagine RGB possiede tre distinti istogrammi, corrispondenti ai tre canali *Red*, *Green* e *Blue*, ciascuno con 256 punti in ascissa (Fig.31). Un esempio di operazione puntuale è l'operazione di sogliatura prima menzionata, oppure quella di equalizzazione dell'istogramma. Quest'ultima, assieme ad altre tecniche di elaborazione dell'immagine digitale, è stata utilizzata all'interno del metodo per la ricerca di residui che verrà analizzato nel paragrafo 3.3. Si noti che nelle operazioni puntuali il tipo di trasformazione effettuato, cioè il valore in uscita nel punto  $(x, y)$ , dipende solo dal valore in ingresso nel punto  $(x, y)$ .

Non si ha la medesima situazione nelle operazioni spaziali, le quali sfruttano, per determinare il valore del pixel di destinazione, non solo il valore del pixel stesso nell'immagine originale, ma anche il valore di alcuni pixel ad esso vicini.

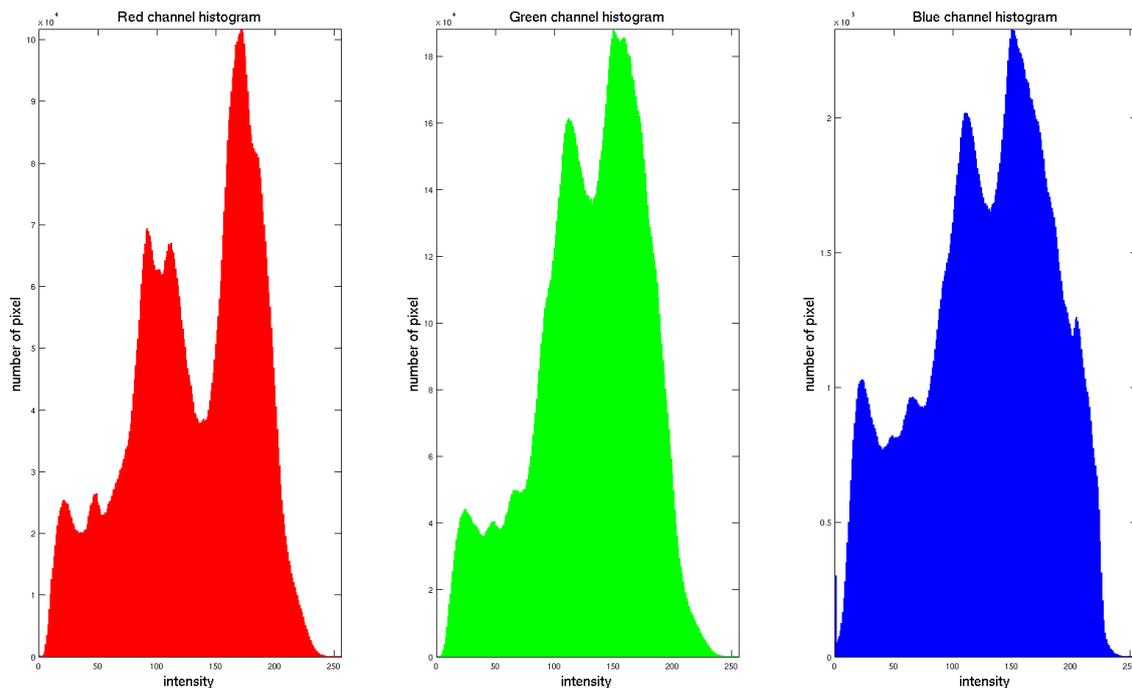


Fig.31 Iistogrammi del canale rosso (R), verde (G) e blu (B) di una data immagine [65].

È l'utente stesso che deve impostare quali pixel vicini considerare, cioè la finestra di vicinanza su cui l'operatore spaziale deve lavorare.

Tra gli operatori spaziali maggiormente utilizzati vi è il filtro media, che calcola la media aritmetica dei pixel all'interno di una data finestra ed impone quel valore, oppure il filtro mediano, che lavora, invece, con la mediana statistica. Esistono anche operazioni più avanzate, che richiedono l'utilizzo di algoritmi più complessi e sofisticati e che, di conseguenza, offrono risultati più specifici e ottimali. Alcuni di questi algoritmi, tra cui la segmentazione, sono stati adoperati nel metodo descritto nel paragrafo 3.3.

L'elaborazione digitale delle immagini, in contrapposizione con quella analogica, evita di distorcere il segnale originale durante il processo di elaborazione. Inoltre, sulle immagini digitali è possibile eseguire operazioni molto complesse in tempi significativamente brevi, operazioni che sarebbero impraticabili con l'elaborazione analogica. Per questa ragione, l'*image processing* trova applicazioni in svariati settori. Ad esempio, nel settore medicale (*medical imaging*), in cui l'elaborazione digitale delle immagini è fondamentale per la diagnosi e il trattamento. Mediante tecniche avanzate di segmentazione, è possibile identificare e misurare con precisione tumori e altre anomalie in immagini di risonanza magnetica (MRI) o tomografie computerizzate (CT). Queste tecniche permettono di visualizzare dettagli che potrebbero non essere visibili con metodi analogici, migliorando significativamente l'accuratezza diagnostica e la pianificazione chirurgica [66].

In ambito industriale, l'elaborazione digitale delle immagini viene utilizzata per il controllo della qualità durante la produzione. Ad esempio, nelle linee di produzione automobilistica i sistemi di visione artificiale possono ispezionare componenti per rilevare difetti minori come graffi, ammaccature o imperfezioni nella verniciatura. Questi sistemi possono operare a velocità elevate, garantendo che ogni pezzo prodotto rispetti gli standard di qualità senza rallentare il processo produttivo. Allo stesso modo, nel *food packaging* l'*image processing* è utilizzato per migliorare l'efficienza e l'accuratezza del controllo qualità. I sistemi di visione artificiale<sup>7</sup> sono in grado di ispezionare automaticamente i packaging, verificando la presenza di difetti come etichette mal posizionate, sigilli non corretti, graffi, presenza di contaminazione etc.

---

<sup>7</sup> Un sistema di visione artificiale utilizza telecamere e algoritmi di elaborazione delle immagini per automatizzare l'ispezione e l'analisi di prodotti e processi in tempo reale.

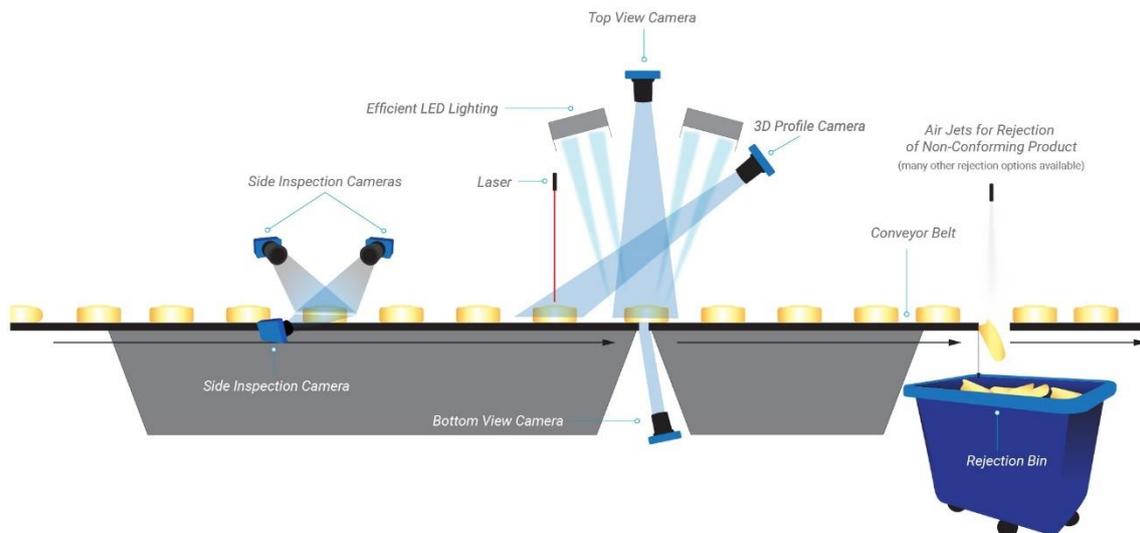


Fig.32 Schema esemplificativo di un sistema di computer vision per il controllo qualità di determinati contenitori alimentari applicato su un nastro trasportatore [67].

## 3.2 Setup sperimentale

La ricerca esposta in questa tesi affronta in modo diretto la problematica dell'ottimizzazione della logistica inversa nel caso di contenitori alimentari in plastica. Nel particolare, ci si sofferma sull'aspetto del controllo qualità di questi packaging, al fine di determinare la presenza di incrostazioni, quindi di contaminazioni organiche, all'interno degli stessi.

Per l'acquisizione delle immagini che sono state successivamente elaborate, è stato applicato un metodo basato sulla fluorescenza indotta dai raggi ultravioletti (metodo UVIFI).

Il metodo UVIFI (*Ultraviolet Induced Fluorescence Imaging*) sfrutta una sorgente di illuminazione ultravioletta per indurre la fluorescenza in un campione polimerico contaminato, le cui incrostazioni talvolta non sono visibili ad occhio nudo. Le risposte sono acquisite tramite *imaging* digitale e vengono elaborate al fine di analizzare le variazioni nell'intensità del segnale fluorescente ricevuto. Le differenze nelle risposte dei canali rosso, verde e blu sono identificate come caratteristiche adatte a consentire il rilevamento delle incrostazioni [68].

I campioni utilizzati per lo studio sono i più comuni materiali plastici da imballaggio, ovvero packaging costituiti da polietilene tereftalato (PET), di cui è mostrato un esempio in *Fig.33*.

Come già sottolineato nel paragrafo 2.2.2 sulla logistica inversa, prima di acquisire le fotografie dei packaging e di procedere con le loro analisi, i contenitori vengono lavati ed asciugati. Solamente dopo la fase di *cleaning*, i packaging vengono sporcati inserendo una soluzione di maionese ed acqua distillata al suo interno, la cui concentrazione varierà a seconda dello scenario. La soluzione viene sparsa omogeneamente sulla base del contenitore, facendo inclinare e ruotando il packaging lentamente.



*Fig.33 Esempio di uno dei packaging in PET utilizzati per il caso di studio in analisi*

Per poter applicare l'*Ultraviolet Induced Fluorescence Imaging* è necessaria una specifica attrezzatura. Innanzitutto, serve una sorgente di luce ultravioletta, ossia delle lampade UV ad alta intensità in grado di emettere luce nella gamma di lunghezza d'onda che va dai 320 ai 400 nm. La luce ultravioletta è una forma di radiazione elettromagnetica avente una lunghezza d'onda più corta della luce visibile, quindi risulta non visibile all'occhio umano.

In base alla lunghezza d'onda della luce UV, questa può essere suddivisa in tre categorie:

- UV-A (320-400 nm): è la più vicina alla luce visibile e rappresenta la più sicura per l'uso umano. Viene utilizzata principalmente nelle applicazioni di fluorescenza indotta.
- UV-B (280-320 nm): è più energetica rispetto alla precedente categoria e può causare danni biologici, come scottature sulla pelle.
- UV-C (100-280 nm): costituisce la gamma più energetica e pericolosa e viene utilizzata principalmente per scopi di sterilizzazione.

Nell'ambito del metodo UVIFI, si utilizza principalmente la luce UV-A, in quanto si rivela meno dannosa rispetto alle UV-B e UV-C, quindi più sicura in fase di utilizzo per ispezioni e analisi in laboratorio.

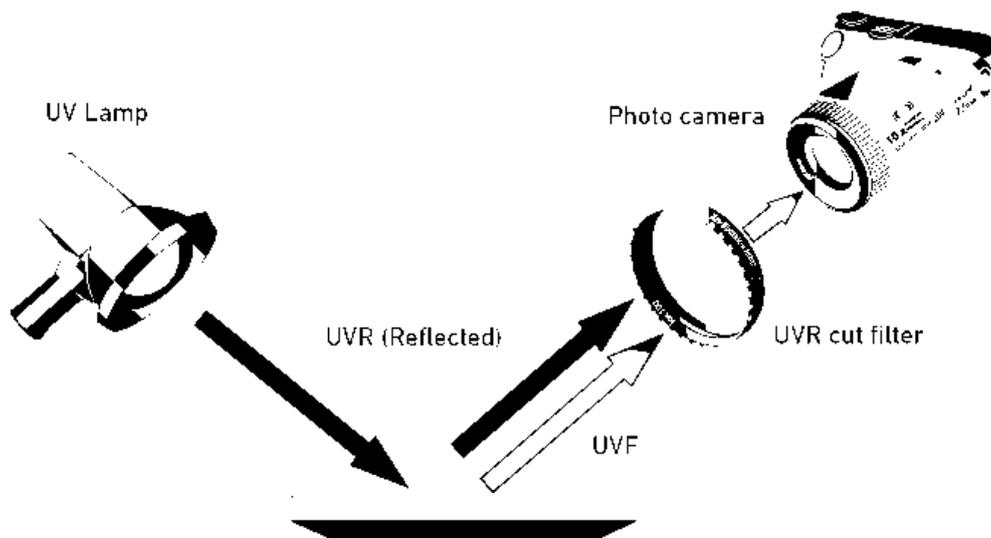


Fig.34 Semplice schema di funzionamento del metodo UVIFI [69].

Molti materiali e sostanze hanno la proprietà di assorbire la luce UV-A e di riemettere luce visibile. In particolare, quando si applica una sorgente di luce UV-A a un materiale, le sue molecole assorbono l'energia ultravioletta. Questo causa l'eccitazione delle molecole, le quali rilasciano l'energia assorbita riemettendo luce a lunghezze d'onda più lunghe (spesso nella gamma visibile), ovvero emettendo fluorescenza.

La luce fluorescente emessa può essere osservata e catturata utilizzando una fotocamera dotata di filtri specifici che bloccano la luce UV riflessa, permettendo quindi solo alla luce fluorescente di passare (*Fig.34*).

Spesso, oltre al filtro posizionato sull'obiettivo della fotocamera per bloccare la luce UV riflessa e permettere solo il passaggio della luce fluorescente emessa dal materiale in esame, viene aggiunto un filtro per la sorgente luminosa. I filtri UV permettono il solo passaggio della luce ultravioletta, bloccando quindi le altre lunghezze d'onda al fine di evitare che la luce visibile interferisca con l'osservazione della fluorescenza.

Alternativamente ai filtri UV, è possibile utilizzare dei particolari box d'acciaio otticamente isolati, i quali hanno la medesima funzione dei filtri appena descritti.

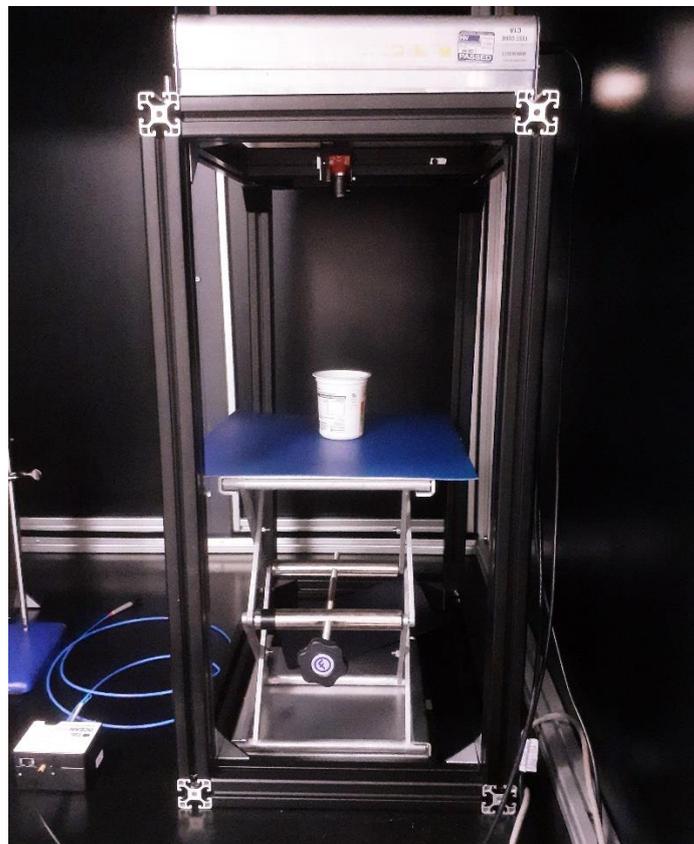
Le immagini, la cui analisi con annessi risultati verrà esposta nel successivo capitolo, sono state acquisite nel laboratorio dell'Università di Loughborough dal professore Elliot Woolley.

Per l'acquisizione delle immagini è stata utilizzata la seguente componentistica:

- Una coppia di lampade fluorescenti da 18 W e 370 nm (UV18W BLDTU, UV Light Technology Limited) come sorgente di luce (*Fig.35*);
- Gomma per nastro trasportatore di colore blu (Beeston Belting) come sfondo per l'acquisizione delle immagini (*Fig.36*);
- Telecamera AV ALVIUM® 1800U-240C-CH-C, da 2,4 MP a colori per ottenere le immagini da analizzare;
- Filtro a passaggio stretto MIDOPT FIL BI550/25,5 applicato all'obiettivo della fotocamera;
- Box di acciaio otticamente isolato (dim. 1,2 m × 1,2 m × 1,2 m) usato come recinto di sicurezza per la luce UV (*Fig.37*).



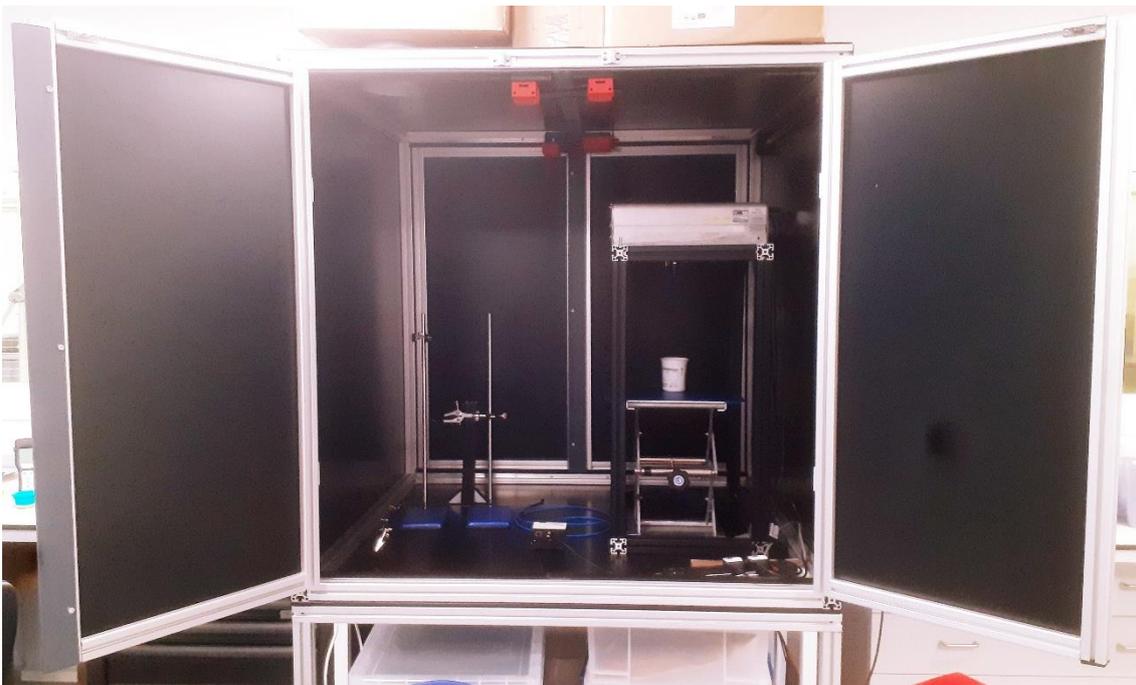
*Fig.35 Coppia di lampade fluorescenti utilizzata per l'analisi.*



*Fig.36 Materiale in PVC utilizzato come background per l'acquisizione delle immagini.*

Inoltre, la messa a fuoco e l'apertura dell'obiettivo sono state regolate manualmente per ottimizzare la nitidezza dell'immagine. Il tempo di esposizione, invece, è stato di 0,94 secondi per tutte le immagini acquisite.

Questa metodologia presenta una serie di vantaggi non indifferenti. Primo tra tutti, la velocità di applicazione. Tuttavia, una volta che è stato creato il sistema ideale con l'attrezzatura sopracitata, la fase di elaborazione delle immagini, nonché la quantificazione dei residui di materiale all'interno dei packaging, richiede un metodo di *image processing* valido e robusto. Quest'ultimo, qualora risulti efficiente per il caso d'uso, può essere completamente automatizzato attraverso l'utilizzo di un sistema di visione artificiale, il che aumenterebbe ulteriormente la velocità del processo.



*Fig.37 Setup sperimentale completo.*

Facendo un confronto con l'altrettanto valido test ATP, il metodo UVIFI risulta più economico, in quanto, una volta che si è costruito il setup sperimentale, non sono praticamente necessarie ulteriori spese. Per quanto riguarda il test ATP, invece, oltre al luminometro, è richiesta la spesa fissa dei consumabili, cioè dei tamponi e dei reagenti.

Un'altra differenza risiede nel fatto che il test dell'ATP è distruttivo, perché va letteralmente ad estrarre fisicamente la presunta contaminazione dal contenitore; il metodo UVIFI, invece, permette di riutilizzare il campione potenzialmente un numero infinito di volte. Inoltre, il metodo della luce ultravioletta indotta rileva un'ampia gamma di contaminanti organici (Fig.34), mentre il test dell'ATP rileva solamente le contaminazioni di tipo biologico. D'altra parte, il test ATP risulta molto più sensibile, in quanto il luminometro riesce a rilevare anche bassissime quantità di ATP; il metodo UVIFI, invece, ha una sensibilità più moderata, poiché dipende dalla fluorescenza. A tal proposito, è importante sottolineare il fatto che non tutte le aree fluorescenti possono rappresentare una contaminazione; oltretutto, non tutte le contaminazioni sono fluorescenti, quindi alcune potrebbero non essere rilevate. Perciò, può essere necessario interpretare i risultati con cautela, il che rende l'UVIFI un metodo con una facilità d'uso inferiore rispetto al test dell'ATP.

In conclusione, in ambito di packaging alimentare, il metodo ATP è più preciso ed è, infatti, ampiamente accettato e standardizzato per il controllo della qualità alimentare. Nonostante ciò, l'UVIFI presenta una serie di vantaggi non indifferenti che il test ATP non possiede; tra quelli citati, considerando il fatto che si lavora su una grande quantità di campioni, il più rilevante è sicuramente quello della sua economicità.



Fig.38 La versatilità dell'UVIFI permette di poter applicare questa tipologia di analisi in svariati contesti, come quello del restauro delle opere d'arte [69].

### 3.3 La procedura operativa

Come anticipato nel precedente paragrafo, per il caso di studio in questione è stata utilizzata una serie di tecniche di *image processing*, nello specifico di preelaborazione e di segmentazione delle immagini.

In generale, con la dicitura “preelaborazione di immagini digitali” (*image preprocessing*) si intende tutto quel gruppo di operazioni che vengono effettuate sulle immagini prima di qualsiasi analisi più complessa, con l'obiettivo ultimo di migliorare la qualità delle stesse e di rendere più efficace il processo di analisi successivo [70]. Un uso opportuno della preelaborazione delle immagini può offrire diversi vantaggi tra cui risolvere delle problematiche che, in ultima analisi, portano ad un miglior rilevamento delle caratteristiche locali e globali.

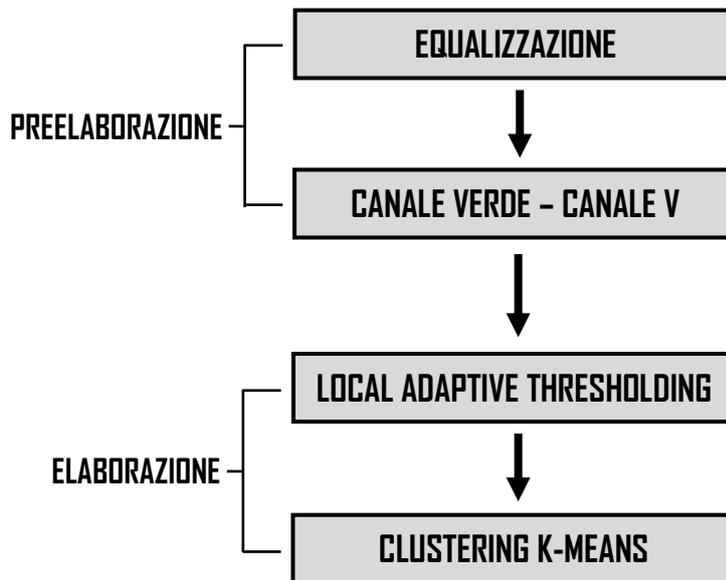
Tra i principali obiettivi che ci si pone in una fase di *preprocessing* dell'immagine vi sono la riduzione del rumore e il miglioramento di una scarsa illuminazione. Il rumore in un'immagine si riferisce a variazioni casuali e indesiderate nei livelli di intensità dei pixel, i quali non rappresentano più correttamente la scena originale. Questo rumore può essere causato da vari fattori durante l'acquisizione, come la temperatura dell'ambiente circostante o da interferenze elettroniche dei circuiti della stessa fotocamera. A seconda della tipologia di rumore che viene identificato, si utilizza una specifica tecnica di risoluzione del problema. Nella maggior parte dei casi, il rumore nelle immagini viene ridotto o eliminato attraverso i filtri, ossia degli strumenti matematici che, applicati alle fotografie, permettono di manipolare opportunamente i pixel che presentano delle criticità.



Fig.39 L'importanza del *preprocessing* in una serie di immagini: per passare dall'immagine originale (sinistra) a quella post-soglia (destra), è stato necessario applicare un processo intermedio (centro) di isolamento del canale rosso dell'immagine in input [70].

Alle operazioni di *preprocessing* seguono tecniche più mirate di *image analysis*, le quali vanno oltre la semplice manipolazione dei pixel delle immagini. Gli scopi possono essere svariati; tra questi, il riconoscimento di pattern, l'estrazione di caratteristiche, la sogliatura, la classificazione degli oggetti, la segmentazione dell'immagine in regioni di interesse o il raggruppamento di dati simili. Nonostante la potenza di queste metodologie, le operazioni di preprocessing risultano un grande aiuto, se non un passaggio fondamentale, per arrivare all'output finale desiderato (Fig.39).

Per le immagini del caso di studio sono stati applicate due tecniche di *preprocessing* e due tecniche di *image analysis*, nello specifico di segmentazione, come mostrato nel seguente diagramma di flusso.



Schema procedurale per l'elaborazione delle immagini del caso di studio.

In questo caso, la preelaborazione ha avuto la funzione di migliorare la cattiva luminosità del dataset di immagini. Le operazioni successive di *image processing*, invece, sono servite per ottimizzare il rilevamento dei residui di maionese all'interno dei packaging.

Di seguito vengono descritte le tecniche di preelaborazione e di elaborazione delle immagini adoperate per l'oggetto di analisi, a partire dalle ragioni che hanno portato alla scelta di quel determinato metodo.

### 3.3.1 Equalizzazione dell'istogramma

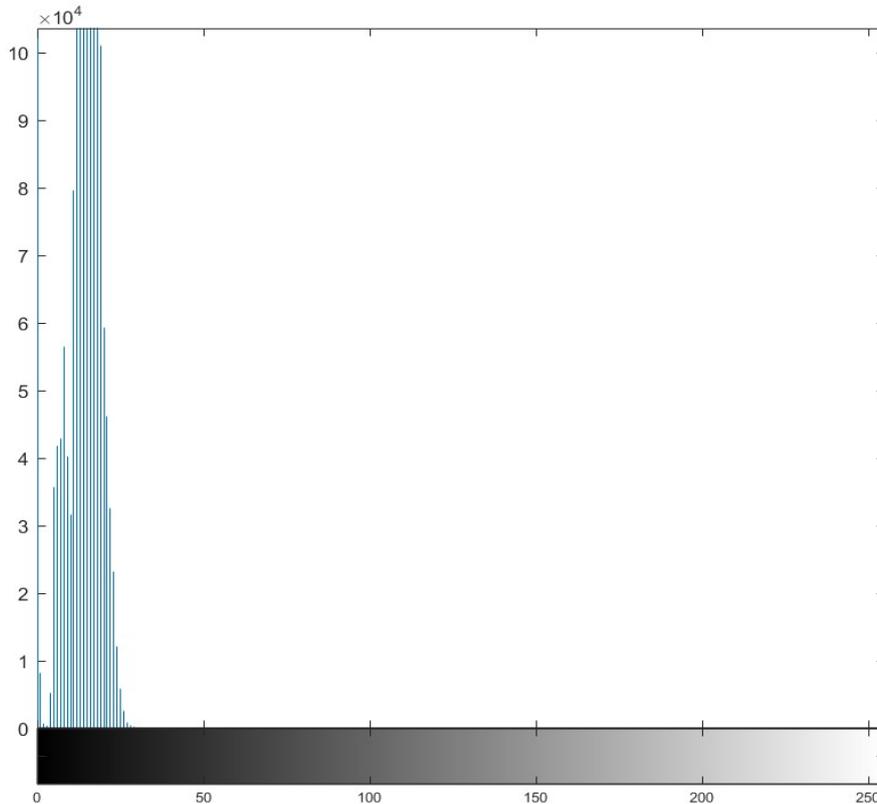
Attraverso un procedimento del tipo *trial and error*, sono state adoperate diverse metodologie per il miglioramento del contrasto delle immagini fornite per l'analisi in input. Infatti, le fotografie originali sono tutte caratterizzate da una scarsa luminosità, la quale non permette di applicare accuratamente alcun metodo di *image analysis*, in quanto non si riescono a percepire i dettagli delle stesse (*Fig.40*).



*Fig.40 Una delle immagini appartenenti al dataset iniziale.*

Un valido metodo che si è trovato per il miglioramento della scarsa luminosità delle immagini del dataset è la cosiddetta “equalizzazione dell'istogramma”. Come espresso nel paragrafo 3.1, l'istogramma di un'immagine è la rappresentazione grafica della distribuzione dei livelli di intensità dei pixel in quell'immagine, nonché la visualizzazione grafica della frequenza di ciascun livello di colore presente nell'immagine. Nelle immagini caratterizzate da poca luminosità, l'equalizzazione dell'istogramma permette di ridistribuire l'intensità dei pixel in modo più uniforme, rendendo i dettagli della fotografia maggiormente visibili [71]-

Attraverso l'utilizzo di MATLAB, software che verrà utilizzato per ogni operazione di preelaborazione e di elaborazione delle immagini relative al caso di studio, si può visualizzare l'istogramma dell'immagine in *Fig.40*.



*Fig.41* Iistogramma dell'immagine in *Fig.40* convertita in scala di grigi (A2).

L'immagine iniziale in *Fig.40* è a colori, quindi teoricamente dovremmo avere tre istogrammi per ogni canale: uno per il canale rosso, uno per il verde ed uno per il blu. Tuttavia, l'immagine risulta poco luminosa ed i singoli canali RGB non racchiudono molte informazioni. Per questa ragione è più opportuno combinare l'informazione dei tre canali di colore in un singolo livello di intensità. Convertendo l'immagine in scala di grigi, il relativo istogramma rappresenta la distribuzione dei livelli di intensità della luminanza dell'immagine. Un singolo istogramma, invece di tre, rende più semplice l'analisi in questa applicazione, fornendo inoltre una visione generale del contrasto e della luminosità dell'intera immagine. Dall'altra parte, si perde l'informazione specifica di ciascun colore, il che può essere un limite nei casi in cui i colori siano importanti per l'analisi. L'asse delle ascisse rappresenta i diversi livelli di intensità dei pixel. Per

un'immagine in scala di grigi, l'asse varia da 0 a 255, dove 0 corrisponde al nero e 255 al bianco. Le ordinate, invece, rappresentano il numero di pixel che corrispondono a ciascun livello di intensità. Più alto è il valore su questo asse, maggiore è il numero di pixel con quel livello di intensità.

Se i valori sono distribuiti uniformemente su tutta la gamma dei livelli di intensità, l'immagine ha un buon contrasto e l'istogramma si dice bilanciato. In caso contrario, l'istogramma è spostato verso sinistra o verso destra: nel primo caso l'immagine è prevalentemente scura, con molti pixel a bassa intensità; nel secondo caso, invece, si ha un'immagine prevalentemente chiara, con molti pixel ad alta intensità. Inoltre, sempre in merito all'interpretazione dell'istogramma, i picchi stretti indicano la presenza di molte aree con livelli di intensità simili, mentre le valli indicano livelli di intensità meno presenti.

Per l'istogramma in Fig.41 risulta evidente il decentramento dei valori, i quali sono distribuiti maggiormente sulla parte sinistra. Questo significa che l'immagine è poco luminosa e per questo motivo si è optato per un miglioramento tramite l'equalizzazione dell'istogramma. La tecnica permette di ridistribuire i valori di intensità dei pixel in modo tale che l'istogramma dell'immagine risultante sia distribuito nel modo più uniforme possibile.

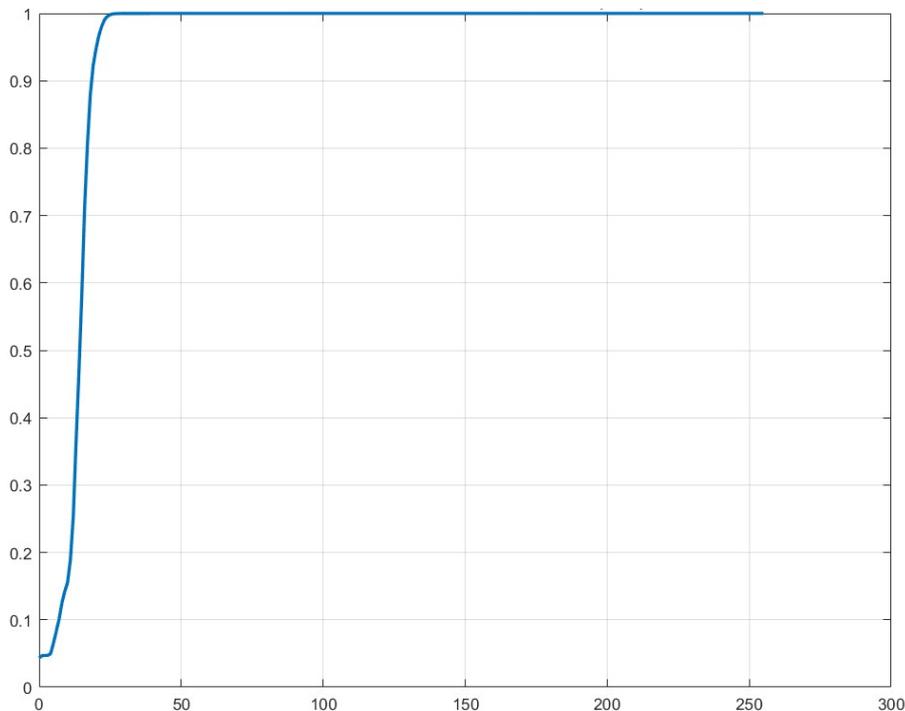
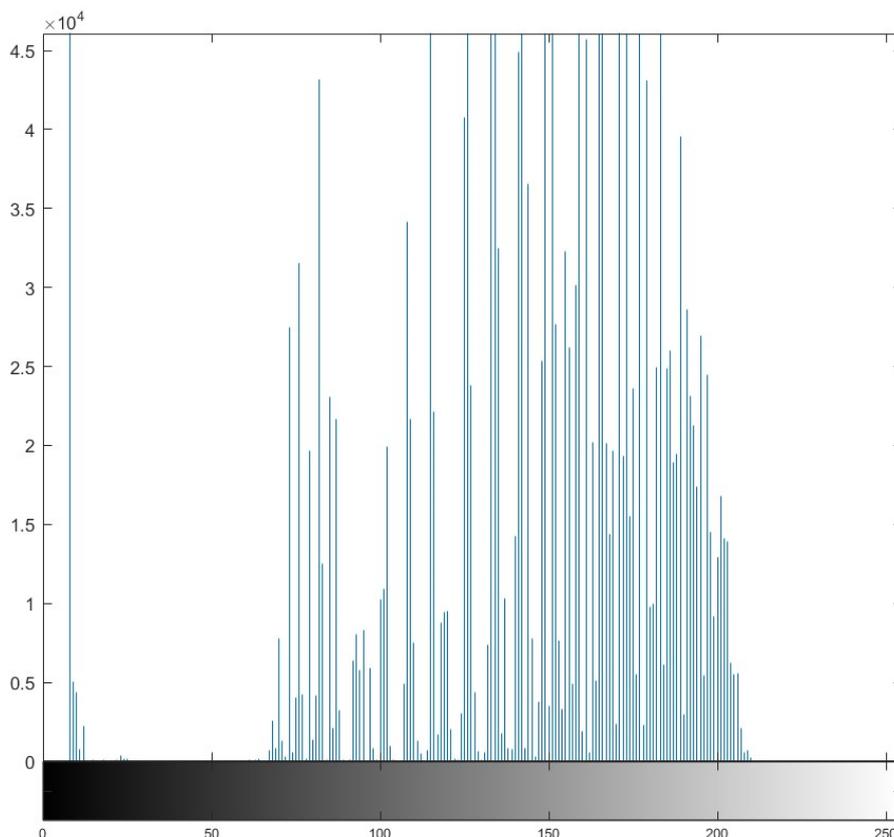


Fig.42 Funzione cumulativa dei livelli di intensità dei pixel di Fig.40 in scala di grigi (A3).

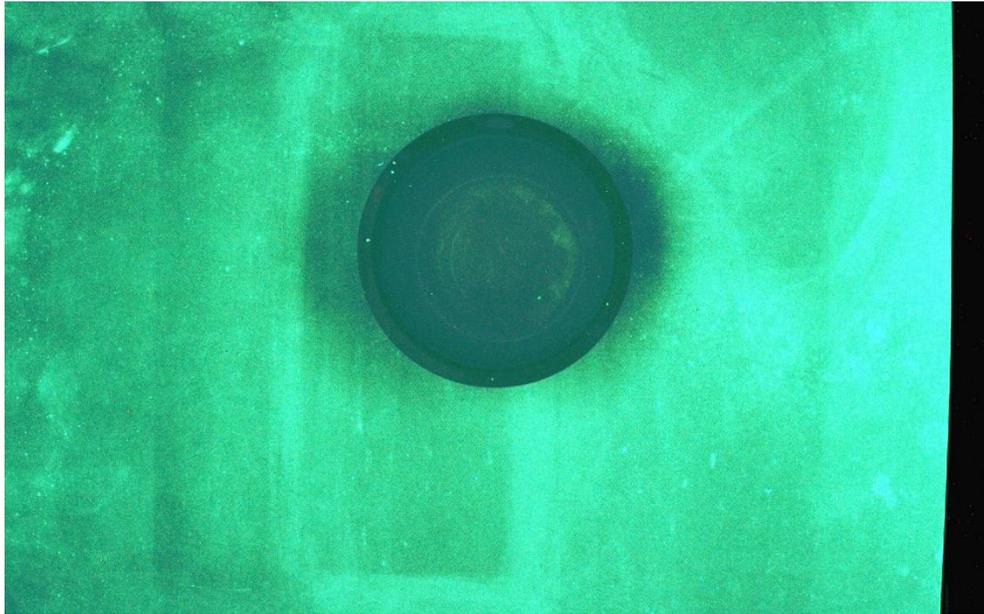
L'equalizzazione dell'istogramma consente di utilizzare meglio l'intera gamma di valori di intensità disponibili, rendendo i dettagli nell'immagine più visibili. Dopo l'estrapolazione dell'istogramma dell'immagine, viene calcolata la funzione di distribuzione cumulativa (CDF). Quest'ultima, per ogni livello di intensità, somma le frequenze di tutti i livelli di intensità inferiori o uguali a quello corrente. Viene normalizzata in modo che il suo valore finale sia 1 (*Fig.42*).

Al calcolo della funzione di distribuzione cumulativa segue la “mappatura” dei pixel. Nello specifico, per ogni livello di intensità dell'immagine originale, la sua intensità viene mappata a un nuovo livello di intensità utilizzando la CDF. Questo significa che i livelli di intensità dei pixel vengono riscaldati in modo che siano distribuiti in modo più uniforme lungo l'intera gamma dinamica disponibile. I livelli di intensità con una CDF più alta vengono mappati a livelli di intensità più elevati, mentre quelli con una CDF più bassa sono mappati a livelli di intensità più bassi.



*Fig.43 Ridistribuzione dei livelli di intensità dei pixel tramite equalizzazione dell'istogramma (A5).*

Questo processo di mappatura cambia effettivamente il valore di ogni pixel nell'immagine originale. I pixel con intensità bassa, che erano inizialmente concentrati in una parte ristretta dell'istogramma, vengono "allungati" lungo l'intero intervallo dei valori di intensità; analogamente, i pixel con intensità elevata vengono "compressi" per adattarsi all'intervallo di intensità disponibile (*Fig.43*).



*Fig.44 Immagine equalizzata (A4).*

Nell'immagine risultante i dettagli precedentemente poco visibili sono diventati più distinti, in quanto il contrasto nel complesso è migliorato ed i livelli di intensità dei pixel si sono uniformati.

### **3.3.2 Spazio colore HSV**

Un'ulteriore tecnica di *preprocessing* che è stata utilizzata al fine di migliorare il rilevamento dei residui nell'immagine è stata quella di passare da una rappresentazione dello spazio colore RGB ad una HSV. Un'immagine RGB è composta dalla sovrapposizione del canale rosso, verde e blu,

e rappresenta il modello di colore che è stato utilizzato fino a questo momento. Ogni pixel in un'immagine RGB è rappresentato da una tripletta di valori numerici, la quale indica l'intensità di ciascun colore primario in quel punto specifico dell'immagine. Ad esempio, considerando una scala da 0 a 255, il pixel esattamente al centro dell'immagine in *Fig.44*, è caratterizzato dalla tripletta [25, 105, 96]. Ciò significa che la quantità di luce rossa presente nel dato pixel è 25, la quantità di luce verde è 105 e quella di luce blu è 96.

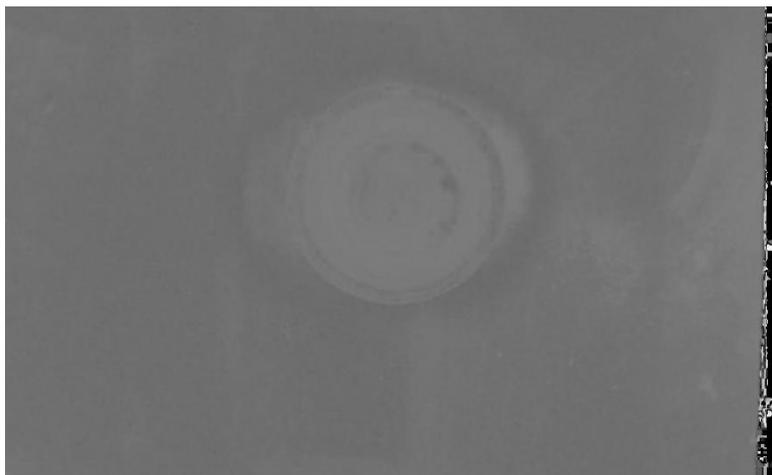
Nell'immagine che si sta analizzando l'informazione sulla quantità di residuo presente nel packaging è contenuta nel canale verde e questo lo si può scorgere dall'immagine equalizzata. La base del packaging contiene dei residui di maionese appena visibili e che risultano più luminosi, in termini di intensità dei pixel, rispetto ai punti in cui non è presente alcuna contaminazione. Questo significa che si deve indirizzare l'analisi sul canale verde dell'immagine equalizzata e sul canale della luminosità.

La luminosità non è un'informazione contenuta all'interno dei canali dello spazio colore RGB, almeno non direttamente. Nello spazio colore RGB la luminosità è distribuita e combinata tra i tre canali, rendendo la sua manipolazione e interpretazione poco intuitiva. Nello spazio colore HSV, invece, la luminosità è rappresentata da un singolo canale "dedicato". La rappresentazione dello spazio HSV è caratterizzata dalla separazione della tonalità (*Hue*), saturazione (*Saturation*) e luminosità (*Value* o *Brightness*) dei colori in tre canali di distinti, che vengono comunemente chiamati rispettivamente canale *H*, canale *S* e canale *V*.

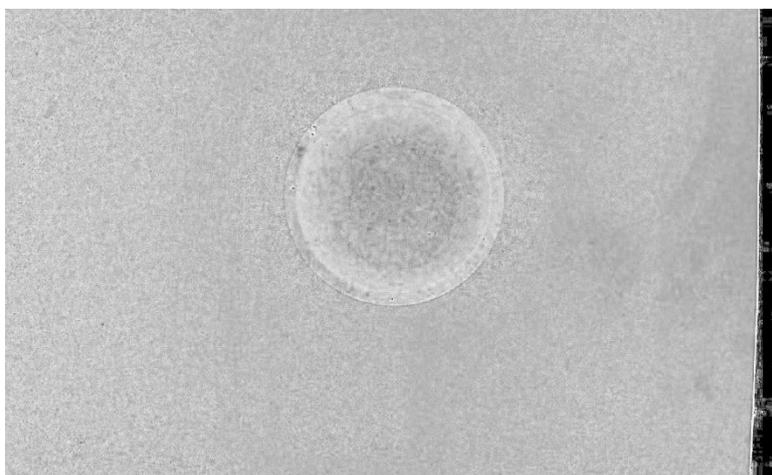
La tonalità descrive la tipologia di colore, ad esempio rosso, verde o blu. È misurata in gradi su un cerchio che va da 0 a 360 gradi, con il rosso a 0 gradi, il verde a 120 e il blu a 240.

La saturazione rappresenta la purezza o l'intensità del colore e la si può immaginare come la quantità di grigio mescolata con il colore puro. In una scala percentuale, 0% indica un colore completamente desaturato, ovvero un grigio, mentre 100% indica un colore completamente saturo, senza aggiunta di grigio.

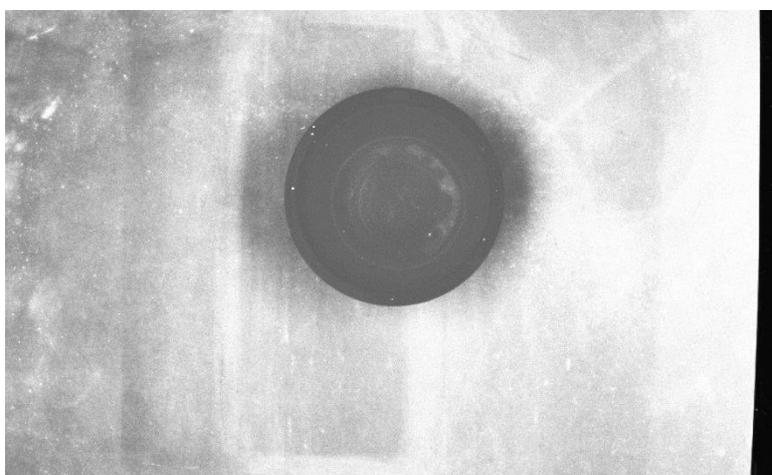
Infine, la luminosità rappresenta la brillantezza o l'intensità luminosa del colore. In corrispondenza dello 0% vi è il nero, quindi l'assenza di luce; il 100%, invece, rappresenta il colore alla sua massima luminosità (bianco per i colori desaturati, colore pieno per quelli saturi).



*Fig.45 Estrazione del canale tonalità (Hue) da Fig.44 tramite spazio HSV (A6).*



*Fig.46 Estrazione del canale saturazione (Saturation) da Fig.44 tramite spazio HSV (A6).*



*Fig.47 Estrazione del canale luminosità (Value) da Fig.44 tramite spazio HSV (A6).*

In *Fig.45*, *Fig.46* e *Fig.47* sono rappresentati i tre singoli canali dello spazio colore HSV estratti dall'immagine in *Fig.44*. Le tre immagini sono mostrate in scala di grigi poiché ogni canale di un'immagine in spazio colore HSV è di per sé una matrice bidimensionale con valori scalari che rappresentano l'intensità di quella particolare proprietà (tonalità, saturazione o luminosità) in quel determinato pixel. Ad esempio, supponendo di avere un'immagine di dimensioni  $4 \times 3$  pixel, il canale *Hue* è rappresentato dalla seguente matrice a due dimensioni:

$H(1,1)$	$H(1,2)$	$H(1,3)$	$H(1,4)$
$H(2,1)$	$H(2,2)$	$H(2,3)$	$H(2,4)$
$H(3,1)$	$H(3,2)$	$H(3,3)$	$H(3,4)$

dove ogni elemento  $H(i, j)$  è un valore numerico che rappresenta la tonalità del colore nel pixel corrispondente.

Il canale *Value* in uno spazio colore HSV rappresenta, come detto, la luminosità dell'immagine, indicando quanto sia chiaro o scuro un pixel. In un'immagine equalizzata, questo canale contiene informazioni sulle aree più luminose e meno luminose dell'immagine. Nello specifico del caso di studio, un'area più luminosa, in corrispondenza del packaging, corrisponde verosimilmente con un'area avente una maggiore probabilità di essere contaminata da residui organici di maionese.

Inoltre, con l'applicazione del metodo UVIFI nell'acquisizione delle immagini, la fluorescenza dei residui di maionese appare particolarmente evidente nel canale verde. Quest'ultimo mette in risalto le aree dove sono presenti con una certa probabilità i residui di maionese, mostrandoli in modo evidente nell'immagine equalizzata. A tal proposito si è pensato di estrarre anche il canale verde dall'immagine in *Fig.44*, al fine di trovare l'operazione tra il canale *Green* e il canale *Value* che desse in output l'immagine più ottimale in termini di rilevamento e identificazione dei residui di maionese. In questo senso, si è valutata la sottrazione del canale *Value* dal canale *Green* (*Fig.48*). il che significa che si stanno rimuovendo le componenti di luminosità generale dall'informazione del colore verde. Questa procedura conserva sostanzialmente le informazioni che sono presenti nel canale verde ma non nel canale della luminosità, ovvero enfatizza le differenze specifiche dovute ai residui di maionese.

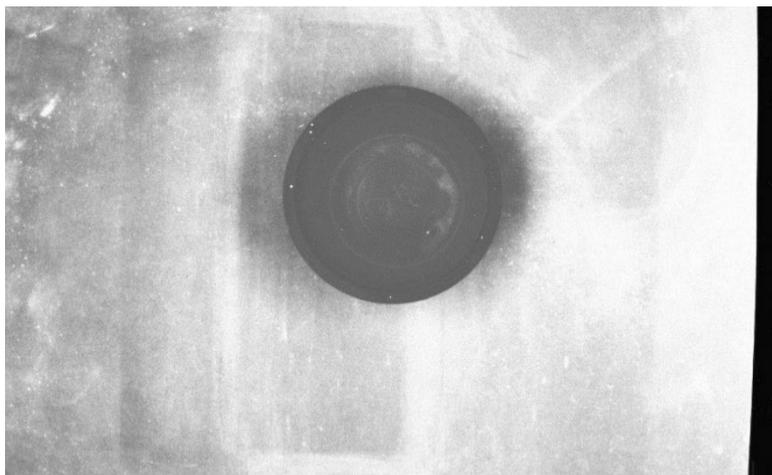


Fig.48 Estrazione del canale verde (Green) dall'immagine in Fig.44 (A7).

Si noti come il canale verde ed il canale della luminosità siano molto simili, seppur non identici (Fig.49). Questo è dovuto alla forte dominanza del colore verde all'interno dell'immagine equalizzata, unitamente al fatto che i residui di maionese riflettono principalmente questo colore.

Sono state eseguite tutte le possibili combinazioni di operazioni tra i vari canali dello spazio colore HSV ed il canale verde. L'operazione di sottrazione tra canale Green e canale Value è risultata essere in ogni scenario quella che offriva un'immagine risultante ottimale da un punto di vista di rilevamento dei residui.

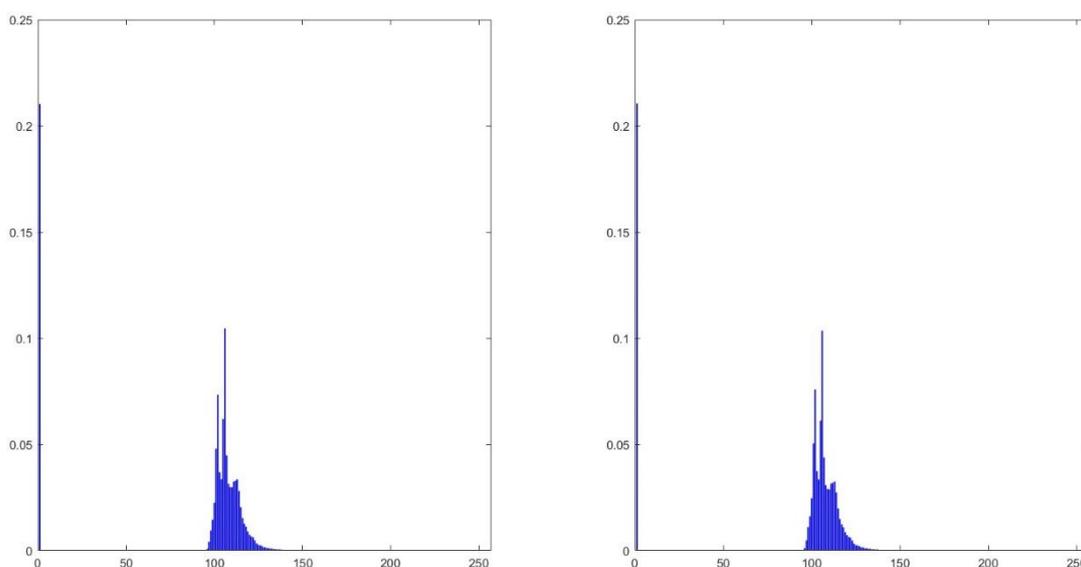


Fig.49 Istogramma di Fig.47 e di Fig.48 in scala di grigi a confronto (A8).

Al contrario, altre combinazioni di operazioni, sia tra gli stessi canali che tra canali diversi, hanno portato una perdita di informazioni essenziali per l'identificazione delle contaminazioni e, quindi, per le tecniche di *image processing* successive.

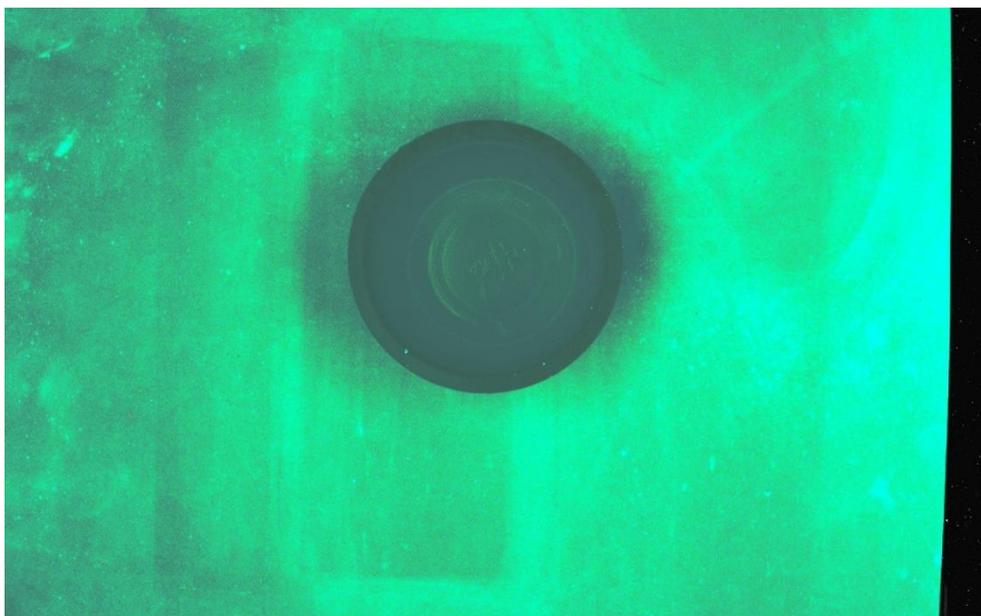


Fig.50 Immagine risultante dall'operazione di sottrazione del canale Value dal canale Green (A9).

È possibile visualizzare le differenze tra l'immagine equalizzata e quella post-sottrazione confrontando gli istogrammi delle due immagini trasformate in *greyscale* (Fig.51). Nello specifico, l'istogramma della sottrazione tra il canale verde ed il canale valore permette di evidenziare maggiormente la fluorescenza nell'immagine, cioè la maggior presenza di colore verde. Questa viene visualizzata nel grafico tramite picchi di frequenza più ampi e più alti.

È importante sottolineare che i risultati forniti dagli istogrammi mostrati in Fig.49 e in Fig.51 riguardano, e devono riguardare, solamente il packaging circolare presente al centro dell'immagine. Fino a questo momento il background attorno al contenitore non è stato eliminato dalle immagini con lo scopo di fornire una migliore visualizzazione delle stesse. Tuttavia, lo studio che viene svolto è concentrato unicamente sul packaging; quindi, tutte le informazioni presenti esternamente al contenitore sono fuorvianti

e tendono a falsificare i risultati nel caso in cui vengano prese in considerazione. Per tale motivo, per tutte le successive immagini, riguardanti le operazioni di *image analysis*, verrà isolato il contenitore soggetto di studio, trascurando lo sfondo circostante.

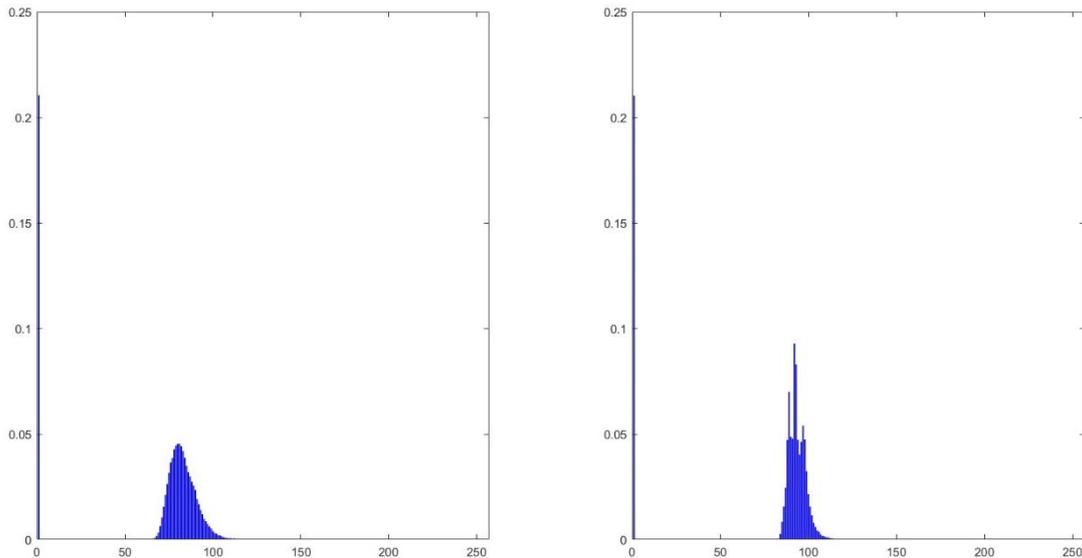


Fig.51 Istogramma dell'immagine equalizzata e dell'immagine post sottrazione a confronto (A10).

### 3.3.3 Local Adaptive Thresholding

Come descritto a inizio paragrafo nello schema concernente la procedura operativa, successivamente alle operazioni di preelaborazione vengono eseguite due tecniche di *image analysis*. La prima di queste è la cosiddetta sogliatura locale adattiva (*Local Adaptive Thresholding*).

È stato scelto di utilizzare una tecnica di sogliatura perché questa permette di isolare gli oggetti di interesse all'interno dell'immagine, eliminando il rumore presente nella stessa. Essendo la segmentazione un processo di suddivisione dell'immagine in regioni significative, le quali corrispondono ad aree omogenee e coerenti rispetto a una certa caratteristica

(come colore, intensità etc.), la sogliatura può essere considerata a tutti gli effetti un'operazione di segmentazione.

Tutte le tipologie di tecniche di *thresholding* hanno lo scopo di binarizzare l'immagine che si sta elaborando. In un'immagine binaria, i pixel vengono classificati in due categorie: quelli al di sopra di una certa soglia vengono impostati al colore bianco (255), mentre quelli al di sotto della soglia vengono impostati al colore nero (0). L'immagine risultante sarà un'immagine in bianco e nero che evidenzia le regioni di interesse, compatibilmente con la scelta di una corretta soglia per la sogliatura. Alternativamente al bianco e al nero, i pixel sopra e sotto la soglia vengono impostati su due colori similmente in netto contrasto, al fine di visualizzare nel modo più distinto possibile le aree di interesse.

Esistono principalmente tre tipologie di sogliatura: quella fissa, quella determinata secondo il metodo di Otsu e quella adattiva. Le prime due tecniche sono state provate per il caso di studio in analisi, ma sono risultate estremamente meno efficienti rispetto all'adattiva.

La sogliatura fissa consiste nell'utilizzare una soglia costante per l'intera immagine. Tutti i pixel con intensità al di sopra della soglia vengono impostati ad un certo valore e quelli al di sotto della soglia vengono impostati ad un altro valore, tipicamente corrispondenti al bianco e al nero. Ad esempio, supponendo di avere un'immagine di partenza chiamata  $I_{input}$ , si può decidere di assegnare il valore 1 per i pixel che hanno un valore di intensità maggiore della soglia  $s$ ; 0 per tutti gli altri. L'immagine binarizzata  $I_{output}$  in ogni pixel  $x$  è definita dall'equazione **(3.1)**:

$$I_{output}(x) = \begin{cases} 0, & \text{se } I_{input}(x) \leq s \\ 1, & \text{se } I_{input}(x) > s \end{cases} \quad (3.1)$$

Nella sogliatura fissa, l'aspetto più importante riguarda la scelta del valore della soglia. La sogliatura fissa da una parte ha il vantaggio di essere semplice e computazionalmente efficiente, ma, dall'altra parte, se la soglia è scelta in modo inappropriato, potrebbe non separare correttamente gli oggetti di interesse dal fondo, specialmente in presenza di variazioni di illuminazione o rumore.

Poiché la scelta manuale del valore di soglia attraverso una sogliatura di tipo fisso è risultata particolarmente macchinosa ed inefficiente, si è pensato di provare col metodo di Otsu. Quest'ultimo condivide con la sogliatura fissa il fatto di impostare un valore di soglia "globale" per l'intera immagine, cioè che viene applicato ad ogni singolo pixel della medesima. Tuttavia, mentre nella sogliatura fissa la soglia è scelta manualmente, nel metodo di Otsu il suo valore è calcolato automaticamente da un algoritmo. Più nel dettaglio, l'algoritmo determina la soglia che minimizza la varianza intra-classe, cioè la somma delle varianze all'interno delle due classi di pixel (oggetto e sfondo). Ciò significa che il metodo di Otsu trova con esattezza la soglia che massimizza il contrasto tra le due classi, rendendo la segmentazione più accurata rispetto a una scelta manuale del valore di soglia nella sogliatura fissa.

Dal momento che la sogliatura classifica i pixel in base ai loro valori di intensità, è essenziale che l'immagine sia in scala di grigi ai fini di una corretta operazione. Se l'immagine è a colori, come nel caso di *Fig.52*, la conversione in *greyscale* riduce l'immagine a un solo canale, rendendo più diretta la manipolazione dei valori di intensità dei pixel.



*Fig.52 Isolamento del packaging da Fig.50, escludendo il background circostante.*

Come evidenziato dai risultati mostrati in *Fig.53* e in *Fig.54*, la sogliatura fissa e la sogliatura tramite il metodo Otsu non sono risultate efficienti per l'evidenziazione dei residui di maionese all'interno del packaging. Per questa ragione, è stato utilizzato un metodo di sogliatura più sofisticato, che non attribuisse un unico valore di soglia all'intera immagine.

Nella sogliatura adattiva, chiamata anche *Local Adaptive Thresholding*, il valore della soglia viene calcolato in modo indipendente per ogni regione locale dell'immagine. Questo significa che la soglia può variare da una parte dell'immagine all'altra, adattandosi alle diverse condizioni di illuminazione e alle variazioni del contrasto all'interno dell'immagine stessa. Le regioni locali possono essere calcolate dividendo l'immagine in una griglia di finestre rettangolari di dimensione prefissata. Dopodiché, in ogni singola area viene applicato il *thresholding*, calcolando la soglia, per esempio, come media dei valori di intensità. Questo approccio risulta molto più flessibile rispetto ai primi due, soprattutto considerando il fatto che sia la definizione delle singole regioni che il metodo di sogliatura in ogni regione possono essere adattati alla specifica immagine che si sta analizzando.

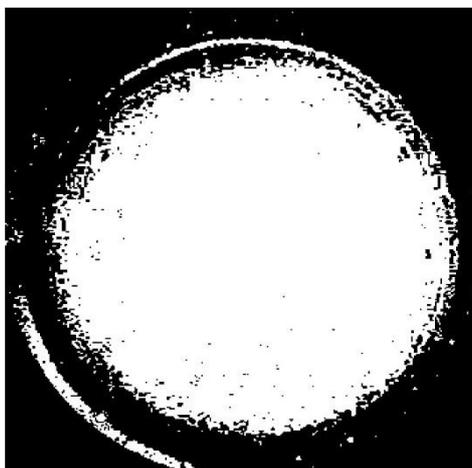


Fig.53 Applicazione della sogliatura fissa all'immagine in Fig.52. In questo caso, la soglia è stata impostata a metà tra il valore minimo e il valore massimo di intensità dei pixel nell'immagine (A11).

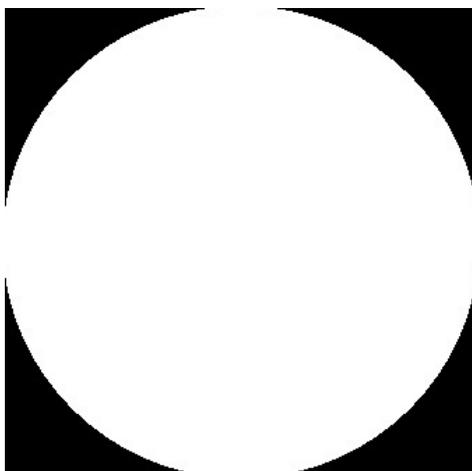


Fig.54 Applicazione del metodo Otsu all'immagine in Fig.52 (A12).

I risultati ottenuti tramite la sogliatura locale adattiva si sono dimostrati più fedeli alla realtà in termini di individuazione dei residui rispetto alle altre tecniche di *thresholding*. Il *Local Adaptive Thresholding*, infatti, ha permesso, per ogni immagine del dataset, di isolare in maniera ottimale i potenziali residui di maionese, facilitando la quantificazione delle contaminazioni per i processi di post-elaborazione.

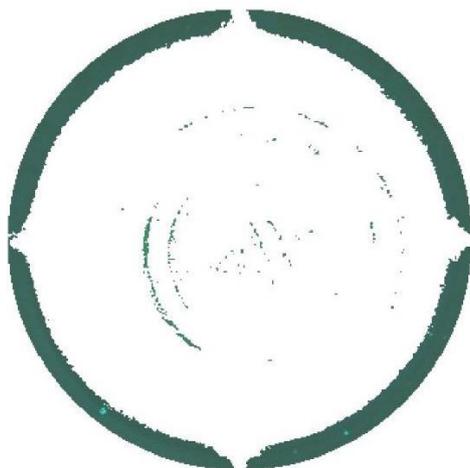


Fig.55 Applicazione del *Local Adaptive Thresholding* all'immagine in Fig.52 (A13).

### 3.3.4 Clustering k-means

Al fine di migliorare il riconoscimento di pattern caratteristici all'interno delle immagini, nonché l'individuazione della presenza di contaminazioni o altri residui nei packaging, è stata applicata una tecnica di *clustering*.

Il *clustering* è una metodologia di analisi non supervisionata che consiste nel partizionare i dati in modo tale che gli elementi appartenenti ad un dato gruppo siano più simili tra loro rispetto agli elementi degli altri gruppi. Con "analisi dei dati non supervisionata" ci si riferisce ad una classe di tecniche che permette di individuare strutture nei dati senza

utilizzare etichette<sup>8</sup> o informazioni predefinite, cercando di scoprire le relazioni intrinseche tra le variabili.

Dunque, l'obiettivo del *clustering* è proprio quello di scoprire la struttura sottostante i dati, andando a suddividere gli elementi in gruppi omogenei, chiamati *cluster*. Questi ultimi hanno lo scopo di aiutare a identificare tendenze e relazioni nei dati che prima del partizionamento non erano immediatamente riconoscibili.

In letteratura sono presenti molteplici tipologie di *clustering*, ognuna delle quali è specifica per determinate applicazioni. In questo caso si è deciso di adoperare un *clustering* di tipo partizionale chiamato *k-means*.

Il *k-means clustering* è un metodo iterativo che consiste nel partizionare un insieme di elementi in *k cluster*. Il primo passo è quello di scegliere in quanti *cluster* si vogliono suddividere i dati; quindi, si definiscono *k* punti casuali, i quali vengono utilizzati “centroidi” iniziali dei gruppi. I centroidi rappresentano il centro di un *cluster* di punti dati e sono calcolati come la media delle coordinate di tutti i punti appartenenti a quel *cluster*. Successivamente, ogni punto viene assegnato al centroide più vicino, andando a creare *k cluster*. Di conseguenza, i centroidi di ogni *cluster* vengono ricalcolati come la media dei punti assegnati a quel *cluster*. L'assegnazione dei punti ai *cluster* e l'aggiornamento dei centroidi sono passi che vengono reiterati fino a quando i centroidi non cambiano più significativamente, ovvero finché l'algoritmo non converge.

L'obiettivo principale dell'algoritmo *k-means* è minimizzare la varianza totale intra-gruppo all'interno dei *cluster*, la quale è definita come la somma delle distanze al quadrato tra ciascun punto e il centroide del *cluster* a cui appartiene. In tale senso, l'algoritmo *k-means* è stato utilizzato come tecnica di raffinamento post sogliatura locale. Infatti, mentre il *Local Adaptive Thresholding* non permette di sfruttare le informazioni sui colori, *k-means* può utilizzare i centroidi per raggruppare i pixel in base alle loro caratteristiche cromatiche, permettendo di distinguere meglio i residui di maionese dal resto del packaging.

---

<sup>8</sup> Nel machine learning le etichette rappresentano i valori di output predefiniti che il modello deve predire. Nel dataset di addestramento della macchina ad ogni esempio è associata una risposta corretta, ossia un'etichetta. In questo senso, le etichette sono utilizzate per guidare il processo di apprendimento del modello.

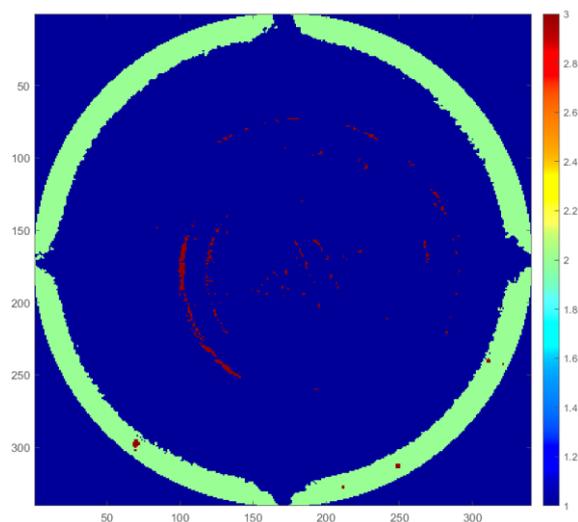


Fig.56 Applicazione del *k-means clustering* all'immagine in Fig.55 (A14).

Inoltre, rispetto alla sogliatura adattiva, il *k-means clustering* permette di distinguere meglio i veri segnali dal rumore, poiché il *clustering* si basa su informazioni tridimensionali di colore (RGB) piuttosto che su singoli valori di intensità.

Per il *k-means* in Fig.56 sono stati utilizzati  $k = 3$  cluster. La partizione di nostro interesse è quella di colore rosso, la quale potrebbe potenzialmente rappresentare la regione con presenza di contaminazioni nel packaging. La barra dei colori sulla destra è stata aggiunta per identificare meglio i tre cluster: colore blu per il cluster 1, colore verde per il cluster 2 e colore rosso per il cluster 3.

In conclusione, la sogliatura adattiva fornisce una segmentazione preliminare efficace; il *k-means clustering* utilizza le informazioni cromatiche per affinare ulteriormente la segmentazione, raggruppando i pixel in *cluster* basati sulla loro somiglianza di colore. Questo processo rende la segmentazione più precisa, permettendo di distinguere con maggiore accuratezza le diverse regioni dell'immagine.

# Capitolo 4

## Applicazioni e risultati

Questo capitolo si sofferma, innanzitutto, sull'interpretazione dei risultati ottenuti adoperando la metodologia descritta nel precedente capitolo a molteplici scenari. Inoltre, vengono analizzate particolari configurazioni nelle quali la concentrazione di maionese risulta più consistente, proponendo un metodo più appropriato per quelle determinate casistiche.

In una seconda parte del capitolo viene descritto il sistema ideale che si dovrebbe avere nel setup sperimentale e come ogni parametro possa influire, negativamente o positivamente, sulla buona riuscita del metodo proposto. Su questa linea, vengono presentate delle applicazioni ulteriori per la serie di tecniche finora descritte, le quali renderebbero il metodo completamente automatizzabile.

### 4.1 Gli scenari

Nel paragrafo concernente il setup sperimentale è stato spiegato il processo di "autocontaminazione" dei packaging in PET, ovvero la modalità con la quale i contenitori sono stati appositamente sporcati prima delle acquisizioni delle immagini. Nello specifico, sono state preparate molteplici soluzioni di acqua distillata e maionese, la cui concentrazione è stata misurata di volta in volta attraverso una bilancia elettronica di precisione, avente un'incertezza di 0,01 grammi.

Il caso di studio si è prevalentemente incentrato su scenari caratterizzati da concentrazioni di residui organici molto basse, inferiori al 5%. In questi specifici casi, valutare la presenza di contaminazioni ad occhio nudo

risulta pressoché impossibile, rendendo quindi cruciale il ruolo dell'elaborazione delle immagini digitali.

L'ultima operazione di *image analysis* che viene applicata al caso di studio è il *k-means clustering*. A prescindere dallo scenario in cui ci si trovi, l'immagine risultante dopo aver clusterizzato l'immagine è il packaging visto dall'alto con una suddivisione dei pixel in tre gruppi distinti.

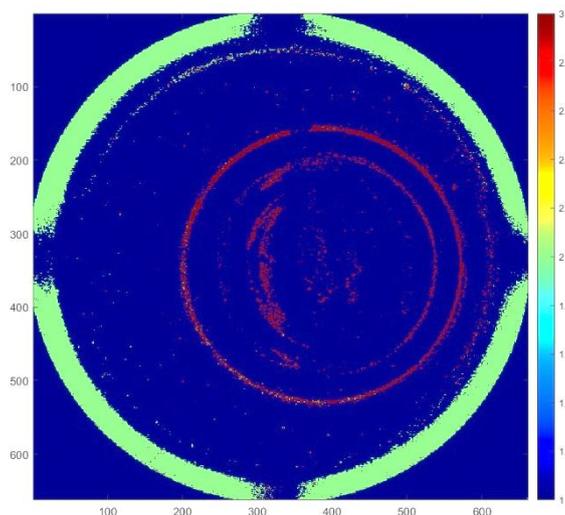


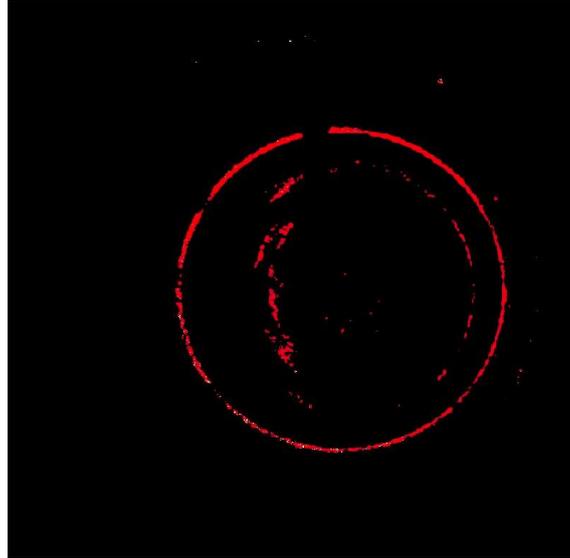
Fig.57 Immagine post-clustering di un contenitore con concentrazione di residui dello 0,01% (A14).

I pixel rossi identificano la potenziale area contaminata. Poiché i packaging utilizzati sono di forma circolare ed essendo la soluzione acquosa posta uniformemente alla base del contenitore, la regione con i residui assume la medesima configurazione. I pixel aventi una colorazione verde rappresentano, invece, il bordo superiore del packaging. Infine, i pixel blu indicano sia la regione interna al contenitore in cui non vi è presenza di residui sia l'area esterna al packaging, ossia il suo background.

L'equalizzazione, la sottrazione del canale della luminosità dal canale verde e la sogliatura adattiva locale si sono rivelate delle procedure essenziali per l'ottenimento di un risultato ottimale dall'operazione di *clustering*. Infatti, dall'immagine clusterizzata in Fig.57 si riescono ad individuare con correttezza le tre regioni presenti nell'immagine.

L'area di interesse per il caso di studio è quella rappresentata dai pixel rossi, per cui una migliore visualizzazione della presunta area di

contaminazione può essere ottenuta andando ad isolare i pixel aventi questa colorazione (*Fig.58*).



*Fig.58 Isolamento dei pixel rossi dall'immagine clusterizzata in Fig.57 (A15).*

Andare a rappresentare unicamente i pixel rossi permette di eseguire un'identificazione più immediata di quella che potenzialmente potrebbe essere l'area contaminata all'interno del contenitore. Questa nuova visualizzazione dello scenario consente di quantificare direttamente la percentuale di residui all'interno del contenitore secondo il rapporto (4.1):

$$\text{Percentuale pixel rossi} = \frac{\text{Pixel rossi}}{\text{Pixel neri} + \text{Pixel rossi}} \quad (4.1)$$

Il denominatore rappresenta il totale dei pixel dell'immagine, nonché la sua risoluzione; il numeratore, invece, lo si può trovare come differenza tra i pixel totali ed i pixel neri. Dunque, l'espressione (4.1) si può riscrivere come nel rapporto che segue (4.2):

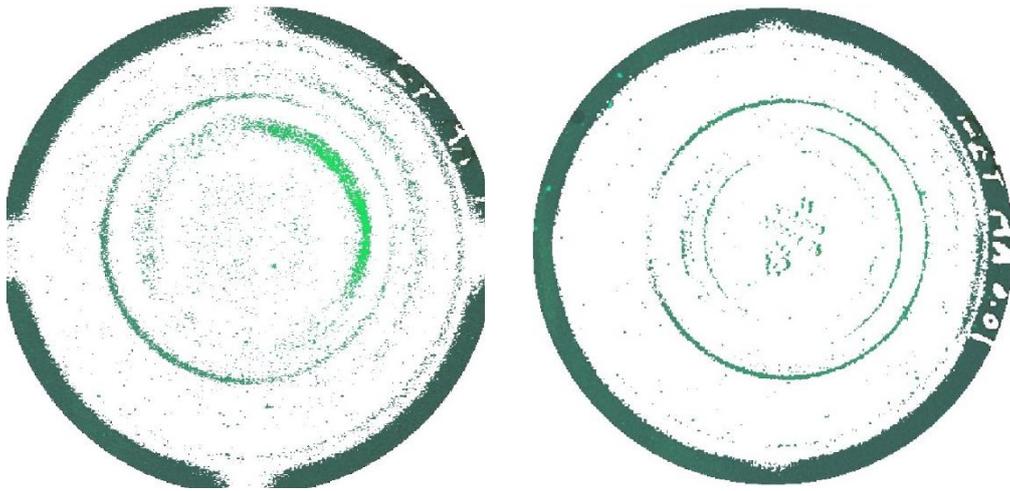
$$\text{Percentuale residui} = \frac{\text{Pixel totali} - \text{pixel neri}}{\text{Pixel totali}} \quad (4.2)$$

Si tenga presente il fatto che la concentrazione di maionese all'interno del packaging non coincide con i risultati ottenuti dal rapporto appena descritto. Infatti, mentre la percentuale di residui, espressa da (4.1) e (4.2), indica percentualmente quanti pixel all'interno dell'immagine rappresentano potenzialmente un "punto contaminato", la concentrazione si riferisce, sempre percentualmente, alla quantità di maionese presente all'interno della soluzione acquosa preparata nella fase di contaminazione del packaging. Sebbene i due valori numericamente non coincidano, l'obiettivo è quello di trovare una correlazione tra i due, in quanto entrambi misurano il grado di sporcizia del packaging. In tal senso, ci si aspetta che concentrazioni alte forniscano percentuali di residui, cioè di pixel rossi, elevate; analogamente, per concentrazioni inferiori si prevedono percentuali di residui più piccole.

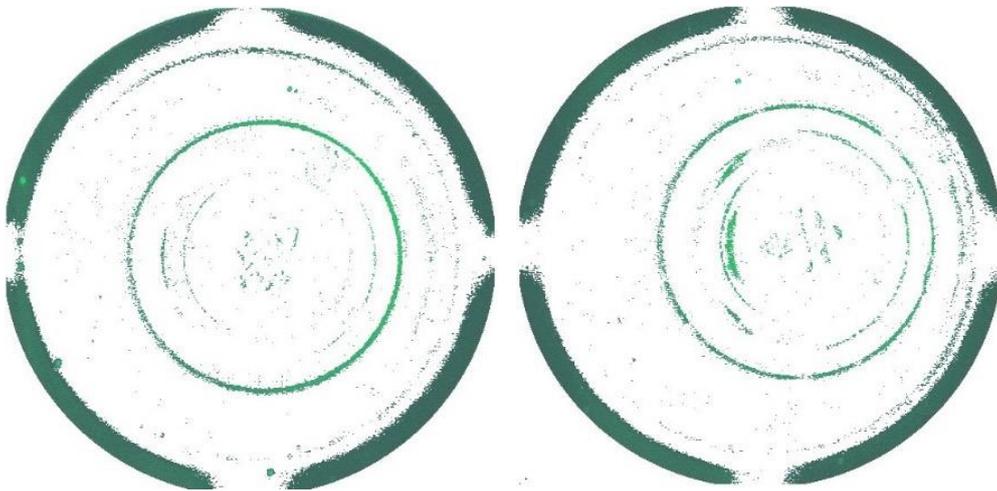
Nel proseguimento di questo paragrafo verranno mostrati le immagini risultanti per i casi di packaging con concentrazione di maionese nella soluzione fino allo 0,00001%, relativamente al *Local Adaptive Thresholding*, al *k-means clustering* e all'isolamento dei pixel di potenziali aree sporche.

Utilizzando la formula (4.2), sono state calcolate le percentuali di residui per differenti scenari di concentrazione, ognuno dei quali è stato analizzato cinque volte. Nello specifico, per ogni casistica di concentrazione, prima di ogni analisi il packaging è stato pulito, asciugato e nuovamente contaminato con la soluzione avente un livello di concentrazione corrispondente allo scenario che si sta studiando. I risultati sono stati misurati sia con l'elaborazione delle immagini sia con il test dell'ATP al fine di ottenere una comparazione diretta tra le due metodologie.

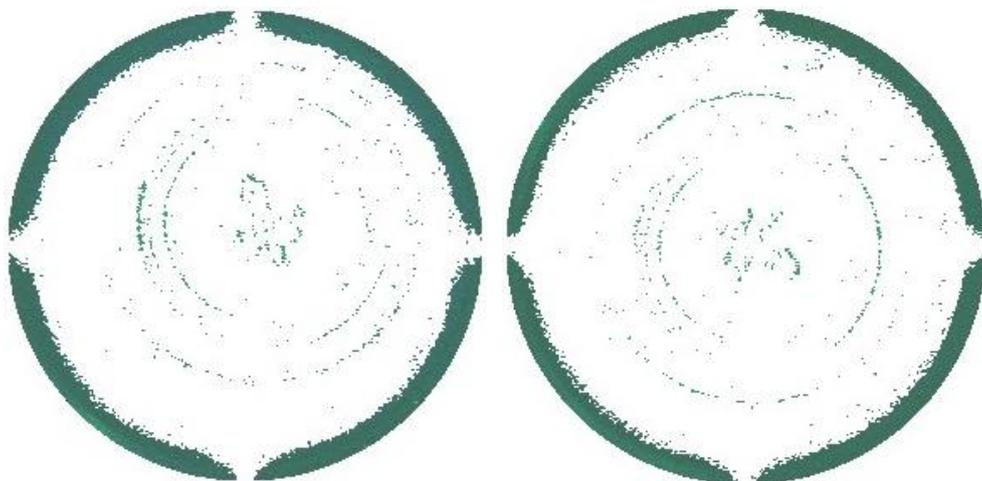
Analizzare le immagini risultanti in diversi scenari di concentrazione permette di valutare l'efficacia del metodo di *image analysis* scelto, in particolare fino a che livello di concentrazione di maionese le tecniche di elaborazione in questione consentono di individuare le zone contaminate. La ragione della ripetuta analisi per ogni singolo livello di concentrazione risiede, invece, nel fatto che i risultati sono affetti da una variabilità sia esogena che endogena. Con la prima si intende che le condizioni di lavoro non sono sempre le medesime (illuminazione, rumore di fondo nell'immagine, posizionamento del contenitore etc.), con la seconda ci si riferisce al fatto che le metodologie adoperate non sono delle tecniche "esatte", motivo per il quale possono fornire dei risultati differenti anche a parità di concentrazione.



*Fig.59 Sogliatura adattiva per scenari di concentrazione pari all'1% e allo 0,1% (A13).*



*Fig.60 Sogliatura adattiva per scenari di concentrazione pari allo 0,01% e allo 0,001% (A13).*



*Fig.61 Sogliatura adattiva per scenari di concentrazione pari allo 0,0005% e allo 0,0001% (A13).*



Fig.62 Sogliatura adattiva per scenari di concentrazione pari allo 0,00005% e allo 0,00001% (A13).

Dalle immagini risultanti dall'operazione di *Local Adaptive Thresholding*, si può notare come le aree contaminate risultino effettivamente sempre meno evidenti al diminuire della concentrazione di maionese nella soluzione. Le immagini mostrano una certa coerenza con il deposito dei residui nel fondo del packaging, in quanto i bordi del contenitore, sui quali va a posizionarsi la maionese diluita per conformazione del contenitore stesso, risultano visivamente sempre più "tenui", proprio per il fatto che si è depositata meno maionese in tali punti.

Tuttavia, unitamente alla diminuzione dei residui al diminuire della concentrazione, aumenta il fenomeno della sovrasegmentazione. Questo, approfondito nel paragrafo 4.2, consiste nel considerare erroneamente come sporche delle zone che, in realtà, sono pulite. È il caso delle pareti del contenitore, cioè dell'area tra il bordo superiore del packaging ed il fondo di quest'ultimo. In queste zone si ha la certezza assoluta di non avere residui di maionese, poiché, come spiegato nel paragrafo relativo al setup sperimentale, la soluzione viene depositata unicamente sul fondo del packaging. La diminuzione di concentrazione, unitamente ad una illuminazione non regolare nella foto acquisita del contenitore, comporta la presenza di falsi positivi negli ultimi risultati. In risoluzione a questa problematica si è pensato di applicare una maschera in fase di isolamento dei pixel, cioè di contornare di nero il fondo del packaging, in quanto in quelle zone non vi è sicuramente presenza di residui.

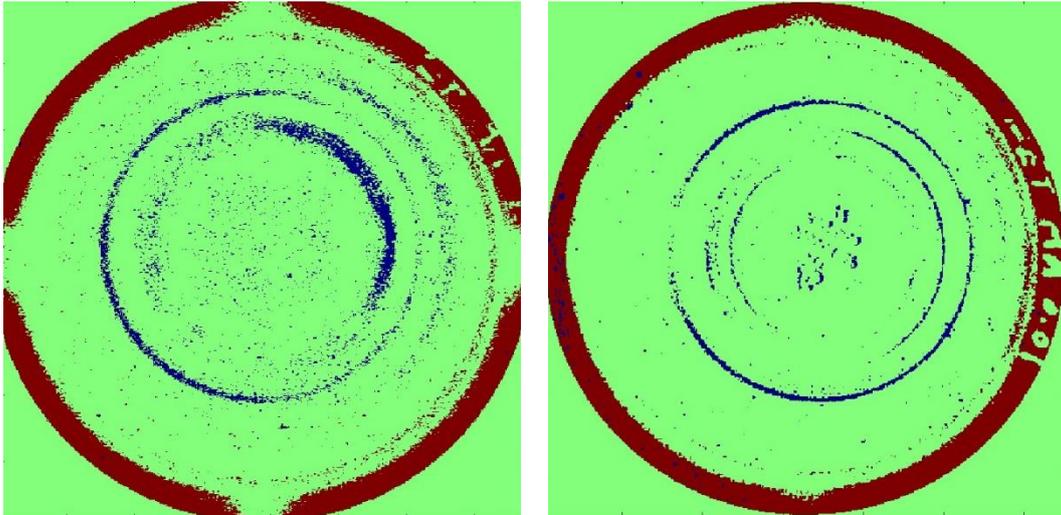


Fig.63 *k-means* per scenari di concentrazione di residui pari all'1% e allo 0,1% (A14).

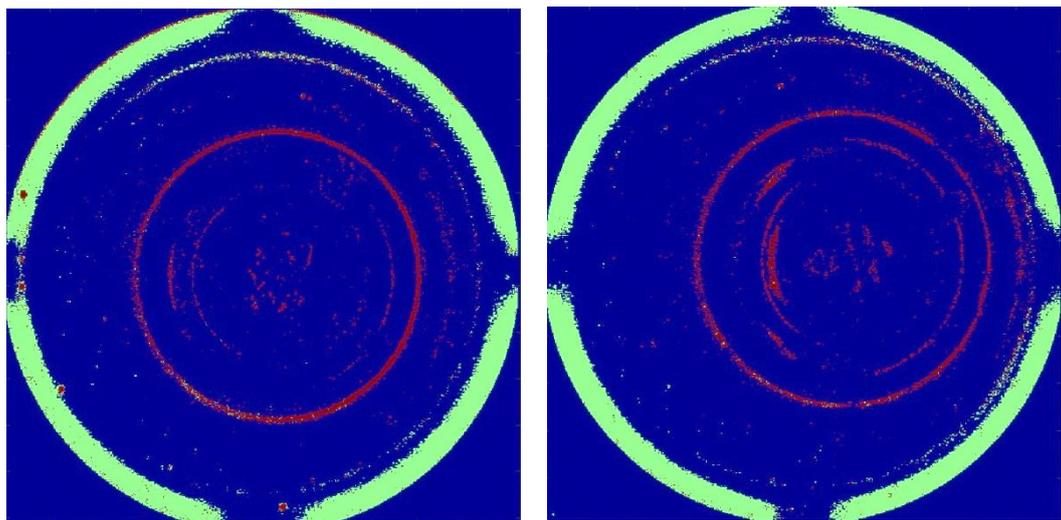


Fig.64 *k-means* per scenari di concentrazione di residui pari allo 0,01% e allo 0,001% (A14).

Come si può notare dalle immagini risultanti dall'operazione di *k-means clustering* in Fig.63 e in Fig.64, nel primo caso i residui sono evidenziati in blu, mentre nel secondo in rosso. Questo è dovuto al fatto che la tecnica di *clustering* in questione si basa sull'inizializzazione di un generatore di numeri casuali, come specificato anche in (A14), per garantire la ripetibilità delle operazioni. Ciò ha comportato una modifica nel modo in cui l'algoritmo ha raggruppato le regioni identificate, ma senza intaccare la modalità con la quale queste vengono classificate. In altre parole, si ha una modifica sostanziale nelle colorazioni, ma non nelle proporzioni di queste.

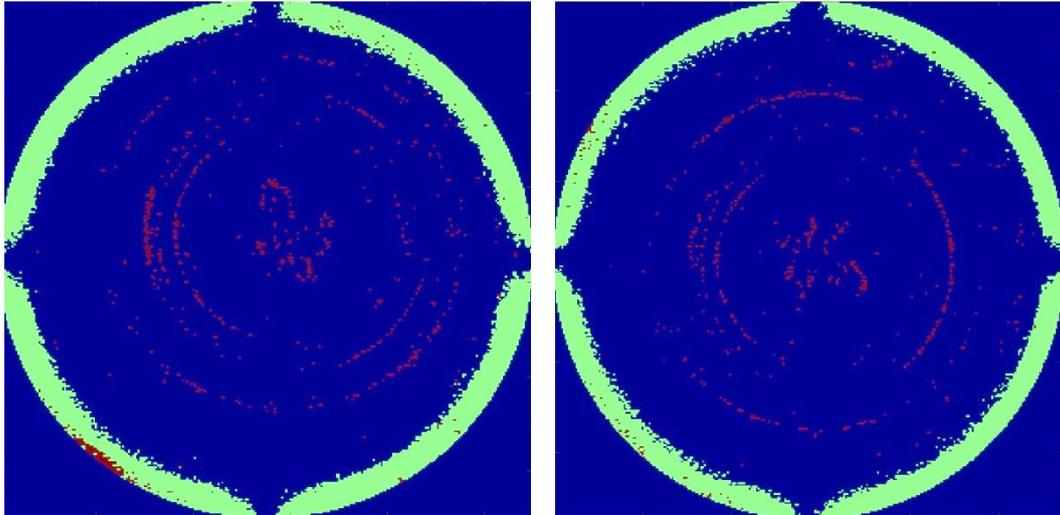


Fig.65 k-means per scenari di concentrazione di residui pari allo 0,0005% e allo 0,0001% (A14).

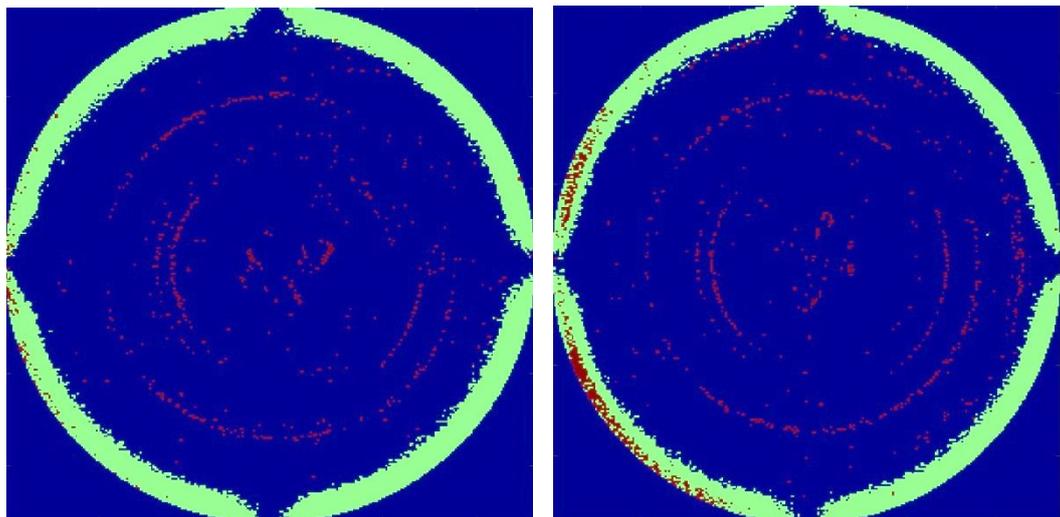
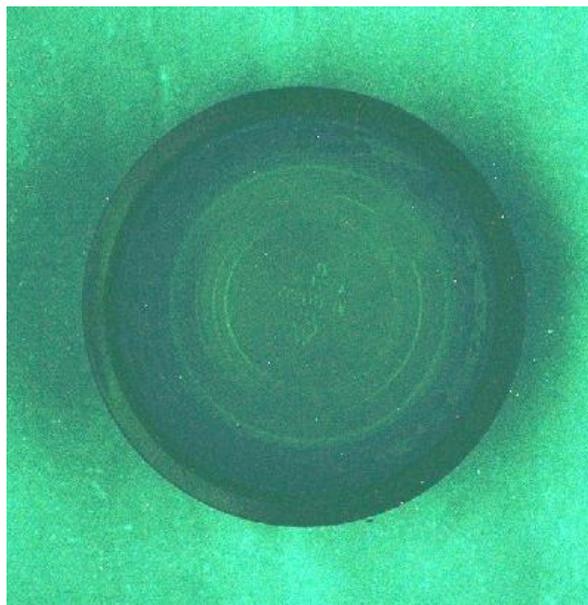


Fig.66 k-means per scenari di concentrazione di residui pari allo 0,00005% e allo 0,00001% (A14).

Il fenomeno dei falsi positivi al di fuori del fondo del packaging si ripercuote anche nelle immagini risultanti relative al k-means clustering. Addirittura, in Fig.65 e in Fig.66, è possibile identificare delle zone sovra-segmentate persino sui bordi del packaging, a causa di una illuminazione non regolare sul medesimo. Prendendo in considerazione il contenitore avente una concentrazione di maionese al fondo pari allo 0,00001%, si osserva una forte irregolarità nella sua illuminazione, evidente specialmente sul bordo del packaging. La relativa immagine equalizzata in Fig.67 permette di scorgere visivamente questa problematica.

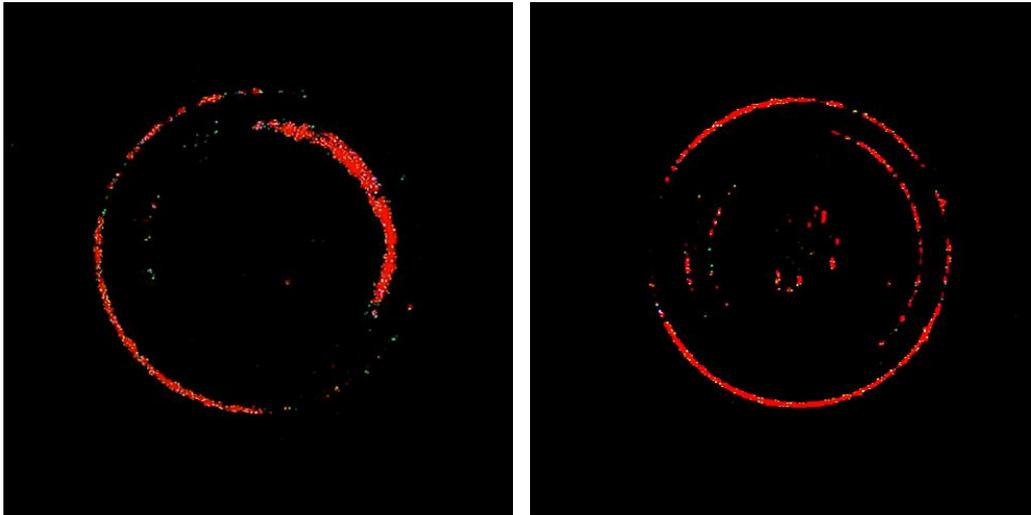


*Fig.67 Immagine equalizzata del contenitore in Fig.66.*

In questa specifica acquisizione, resa maggiormente visibile con l'equalizzazione tramite istogramma, si nota perfettamente come la parte sinistra del packaging è più illuminata rispetto a quella destra, la quale risulta quasi in "penombra". Ciò si è riflesso in una errata segmentazione, in quanto la parte sinistra del contenitore, ben più in risalto rispetto alla restante, è stata classificata come più lucente a causa della fluorescenza della maionese. Infatti, in corrispondenza del bordo sinistro in *Fig.66*, sono presenti diversi pixel rossi, quindi parte di quell'area è stata categorizzata come contaminata. In realtà, la maggiore luminosità in quel punto è dovuta ad una non perfetta centratura del packaging rispetto alle luci UV presenti nel box di lavoro. La risoluzione di problematiche come quella in questione porta ad un'ottimizzazione del processo che consente di evitare procedure di post elaborazione, come la creazione di una maschera che annulli ogni falso positivo nelle zone circostanti al fondo del contenitore.

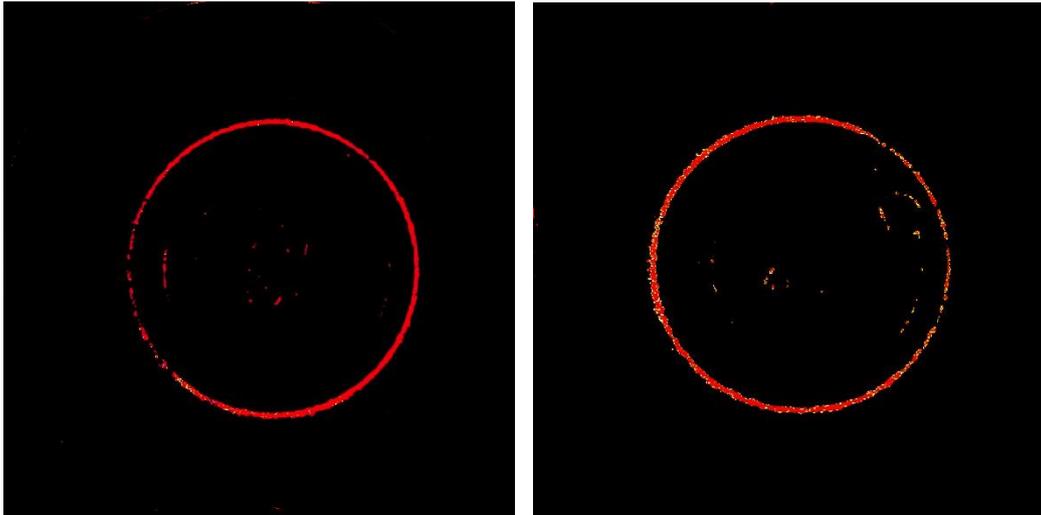
## 4.2 I risultati

Nel presente paragrafo vengono mostrate, per ogni scenario di concentrazione, le immagini dei pixel di zone potenzialmente contaminazione isolati. A partire da queste, sono stati ottenuti dei risultati numerici attraverso l'espressione (4.2). Come anticipato anche nel paragrafo precedente, per ogni livello di concentrazione sono state eseguite cinque analisi, composte da preparazione del setup, acquisizione e ottenimento dei risultati. Dunque, i contenitori sono stati sporcati, fotografati e ripuliti per cinque volte, a parità di packaging utilizzato e di scenario di concentrazione. Mentre nel paragrafo 4.1 è stata mostrata a titolo di esempio una sola acquisizione per scenario di concentrazione, i risultati vengono mostrati nella loro totalità al fine di mostrare la variabilità numerica negli output.



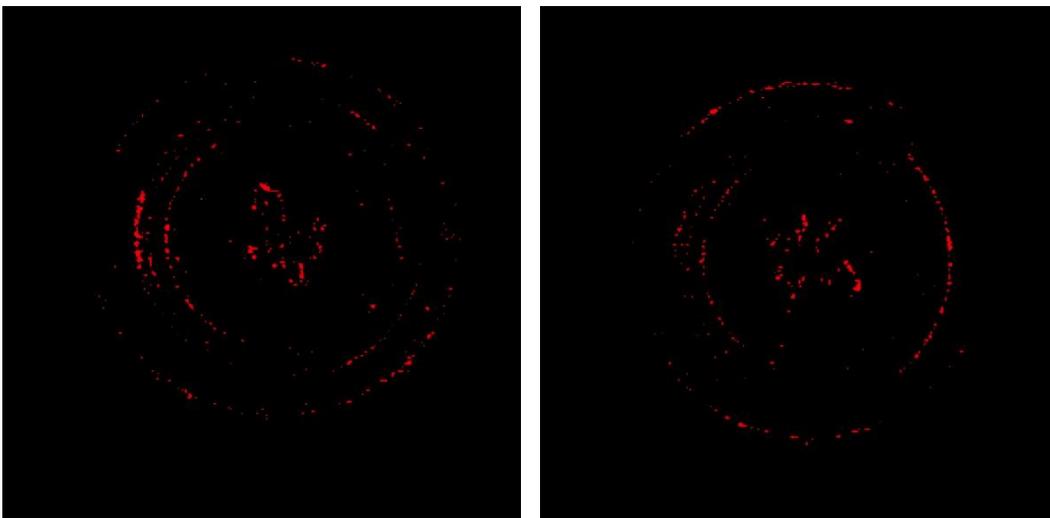
<i>Image processing</i>	Test dell'ATP	<i>Image processing</i>	Test dell'ATP
0,8%	7	0,6%	5
0,87%	7	0,67%	9
0,75%	6	0,6%	5
0,88%	5	0,7%	5
0,9%	8	0,61%	5

Fig.68 Pixel isolati e relativi risultati per concentrazioni pari all'1% e allo 0,1% (A15).



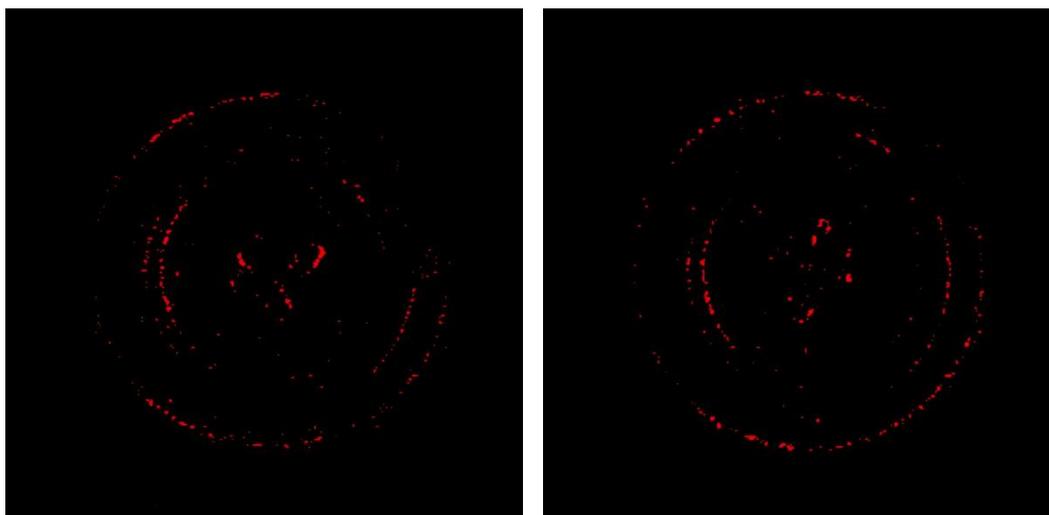
<i>Image processing</i>	Test dell'ATP	<i>Image processing</i>	Test dell'ATP
0,48%	25	0,3%	2
0,42%	4	0,4%	3
0,6%	2	0,34%	2
0,56%	3	0,38%	2
0,5%	4	0,3%	3

Fig.69 Pixel isolati e relativi risultati per concentrazioni pari allo 0,01% e allo 0,001% (A15).



<i>Image processing</i>	Test dell'ATP	<i>Image processing</i>	Test dell'ATP
0,12%	1	0,11%	3
0,21%	3	0,12%	3
0,17%	4	0,15%	1
0,18%	4	0,10%	0
0,19%	2	0,11%	2

Fig.70 Pixel isolati e relativi risultati per concentrazioni pari allo 0,0005% e allo 0,0001% (A15).



<i>Image processing</i>	Test dell'ATP	<i>Image processing</i>	Test dell'ATP
0,11%	4	0,10%	3
0,12%	3	0,09%	2
0,13%	4	0,08%	3
0,12%	2	0,10%	2
0,08%	3	0,11%	0

Fig.71 Pixel isolati e relativi risultati per concentrazioni pari allo 0,00005% e allo 0,00001% (A15).

La correlazione tra la concentrazione di maionese e l'area contaminata individuata tramite elaborazione delle immagini è positiva, poiché all'aumentare della prima aumenta anche la percentuale di residui calcolata tramite *image processing*. D'altra parte, non si ha una relazione di tipo lineare tra la concentrazione di residui ed il valore calcolato in termini di pixel. Infatti, quando la concentrazione di maionese nella soluzione aumenta, cresce la fluorescenza in corrispondenza delle aree contaminate, il che si traduce in un netto aumento del contrasto tra zone pulite e zone sporche. A sua volta, l'incremento del contrasto si traduce in una maggiore rilevazione di pixel rossi, quindi di contaminazione.

Per ridurre al minimo gli effetti del fenomeno dei falsi positivi, approfondito nel successivo paragrafo, nelle immagini dei pixel isolati è stata applicata una maschera nera al contorno del fondo del packaging (A18). Ciò ha permesso di non considerare come contaminate tutte quelle aree che con assoluta certezza non lo erano, tra cui le pareti del packaging ed il bordo superiore.

I valori del test ATP sono espressi in RLU (*Relative Light Units*), misura che indica la quantità di luce emessa durante la reazione di bioluminescenza. Sotto certi livelli di concentrazione, i valori del test ATP tendono ad essere meno affidabili [50]. Si consideri, per esempio, l'*outlier* presente nel primo test con la concentrazione di maionese allo 0,01%, oppure il fatto che i risultati ottenuti a concentrazioni estremamente basse (0,00005% e 0,00001%) non differiscano più di tanto dai risultati riguardanti concentrazioni maggiori (0,001%).

La rappresentazione grafica dei risultati numerici ottenuti nei precedenti scenari (*Fig. 72*) permette di evidenziare maggiormente la differenza nelle misure tra le metodologie. Il grafico a destra, relativo al test dell'ATP, mostra come quest'ultima metodologia abbia un grado di differenziazione peggiore rispetto alla tecnica dell'*image analysis*, in quanto non vi sono grandi discrepanze tra i risultati nei diversi livelli di concentrazione. Questo lo si può notare visivamente dalle rette "ravvicinate" ed incentrate su un ristretto range di valori, per le quali non si riesce a distinguere con chiarezza lo scenario. Utilizzando il metodo dell'elaborazione delle immagini digitali, rappresentato dal grafico a sinistra, invece, questa problematica si verifica in minore entità e unicamente per concentrazioni estremamente basse. Dunque, nello specifico caso di concentrazioni di maionese inferiori al 5%, il metodo dell'elaborazione delle immagini digitali si rivela più efficiente, oltre che più conveniente, rispetto al più tradizionale test dell'ATP.

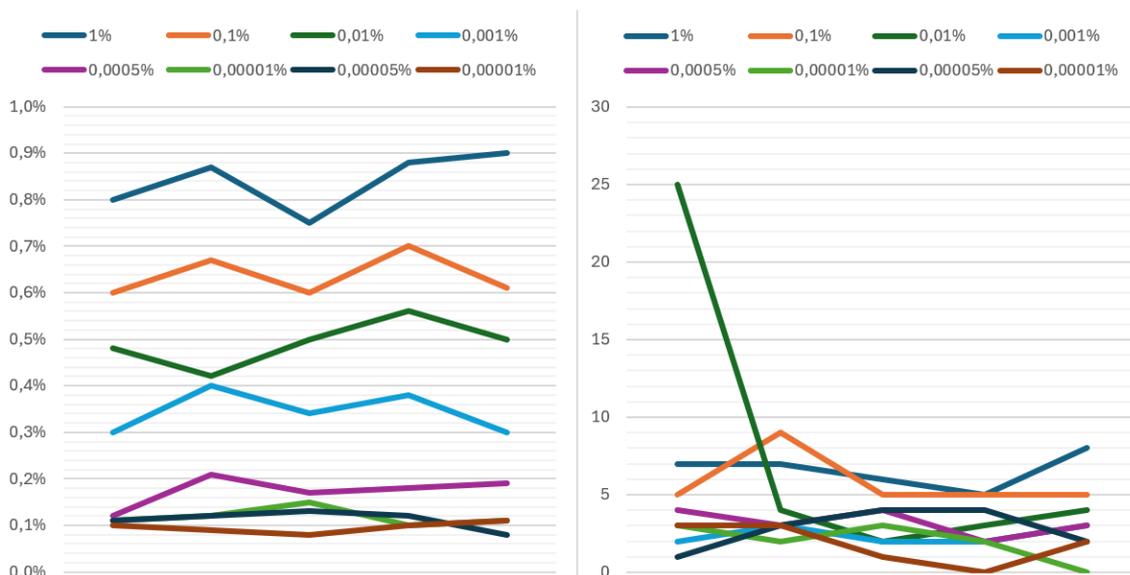


Fig.72 Rappresentazione grafica dei risultati ottenuti negli scenari precedentemente analizzati.

## 4.3 “Extrasegmentazione”

In presenza di concentrazioni di maionese superiori al 5% le tecniche di segmentazione adoperate nell’elaborazione di immagini del caso di studio tendono a offrire risultati meno fedeli alla realtà. Nello specifico, tecniche come il *thresholding* o il *clustering* in determinate situazioni considerano come aree contaminate anche regioni che in realtà non lo sono. Si tratta di un fenomeno che prende il nome di “extrasegmentazione”, in letteratura conosciuto anche come “falsi positivi” o sovrasegmentazione.

Le cause di una sovrasegmentazione possono essere svariate. Nel contesto del caso di studio, i fattori principali che portano ad effettuare in maniera errata la segmentazione delle immagini sono il rumore, i riflessi e l’irregolarità della luce. Più nel dettaglio, la maionese contiene i cosiddetti “fluorofori”, ovvero molecole che assorbono energia elettromagnetica, tra cui la luce ultravioletta, e la rilasciano sotto forma di luce di fluorescenza a lunghezze d’onda maggiori. A concentrazioni più elevate di maionese, aumenta la densità di fluorofori presenti nella soluzione. Questo aumento può portare a un’interazione più significativa tra i fluorofori stessi, quindi a una variazione della fluorescenza, potenzialmente rilevabile dalle fotocamere durante l’acquisizione delle immagini col metodo UVIFI.

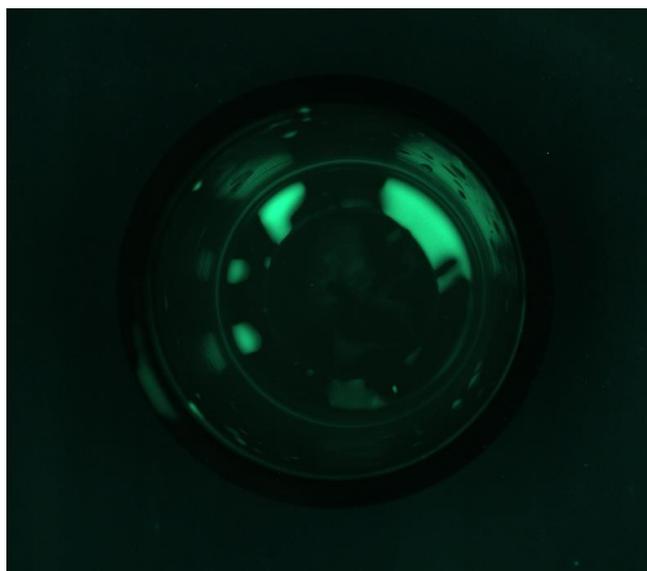


Fig.59 Packaging con una concentrazione di maionese alla base pari al 20%.

L'interazione tra i fluorofori porta al fenomeno del *quenching*, secondo cui la fluorescenza di una molecola viene ridotta o spenta a causa dell'interazione con altre molecole o con l'ambiente circostante. Ciò può alterare l'intensità e la distribuzione della fluorescenza, aggiungendo complessità all'immagine, per esempio aumentando il rumore di fondo. Dunque, la fluorescenza di fondo varia a causa di questo fenomeno e le tecniche di segmentazione possono mal interpretare i presunti segnali di contaminazione. Tuttavia, l'effetto del *quenching* non sempre è sufficientemente forte da sovrastare l'aumento della fluorescenza dovuto all'aumento della concentrazione di fluorofori. In tali casi, la fluorescenza complessiva può effettivamente aumentare con l'aumentare della concentrazione, come nel caso dell'immagine in *Fig.59*, nella quale si può scorgere una conseguenza diretta dell'aumento di concentrazione. È il caso dei riflessi della fluorescenza sui bordi del packaging, dovuti al fatto che i lati del contenitore, essendo lucidi e trasparenti, fungono come degli specchi, riflettendo la luce fluorescente emessa dalla soluzione. Ad alte concentrazioni si crea, dunque, una netta confusione tra segnale e riflesso, portando alla creazione di falsi positivi nell'immagine. Il *thresholding* e il *clustering* in queste circostanze non sono in grado di distinguere correttamente il riflesso della fluorescenza dalla fluorescenza reale dovuta alla contaminazione. Con l'aumentare della concentrazione di maionese nella soluzione questo divario aumenta e i risultati ottenuti risultano sempre meno veritieri.



*Fig.60* Binarizzazione dell'immagine in *Fig.59* tramite sogliatura globale (A16).

Paradossalmente, si è verificato che la sogliatura globale in questi contesti di alta concentrazione permette di segmentare l'immagine in modo migliore rispetto a quella di tipo adattivo.

Si è visto che il fattore più importante quando si applica il *thresholding* fisso è la scelta del valore di soglia. Nel dataset utilizzato per l'analisi del caso di studio sono presenti quattro acquisizioni di immagini relative a contenitori con concentrazione di maionese pari al 5% o superiore. Nella tabella seguente sono mostrate le concentrazioni e i relativi valori di soglia ottimali per la corretta segmentazione della corrispondente immagine.

<b>Concentrazione di maionese</b>	<b>Valore di soglia ottimale</b>
<b>5%</b>	8
<b>10%</b>	30
<b>20%</b>	90
<b>50%</b>	155

Prima dell'applicazione del *thresholding*, le immagini sono state convertite in scala di grigi. Poiché i pixel in *greyscale* possono assumere un valore di intensità di colore che spazia tra 0 e 255, il valore di soglia utilizzabile assume il medesimo range di valori.

I valori ottimali di *thresholding* sono stati ottenuti mediante un processo del tipo *trial and error*. Nello specifico, per ogni valore di concentrazione si è impostata una soglia bassa, pari a 5, e la si è modificata in modo crescente fino a quando l'immagine segmentata non corrispondeva più alla realtà. Difatti, aumentando esageratamente il valore di soglia, le aree che dall'immagine equalizzata risultavano "sicuramente" come zone contaminate vengono valutate come pulite.

I valori di soglia ottenuti hanno mantenuto l'andamento crescente dei dati in input, secondo una relazione non lineare (*Fig.61*). All'aumentare della concentrazione di maionese è stato necessario segmentare l'immagine con un valore di soglia sempre maggiore al fine di ottenere una netta distinzione tra le aree contaminate e le regioni pulite.

Sulla base di questi risultati, è stata creata una curva di regressione che permette di trovare nell'immediato il valore di soglia da impostare per ogni

specifica concentrazione. Il polinomio di best-fit, ossia la curva che meglio si adatta alle concentrazioni in input, consente di interpolare i valori mancanti e di trovare i valori di soglia corrispondenti a nuovi valori di concentrazione.

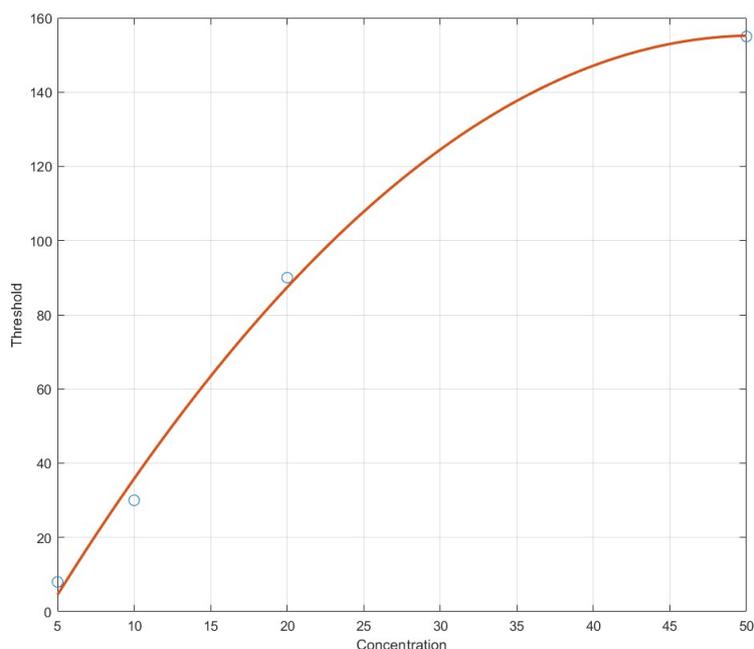


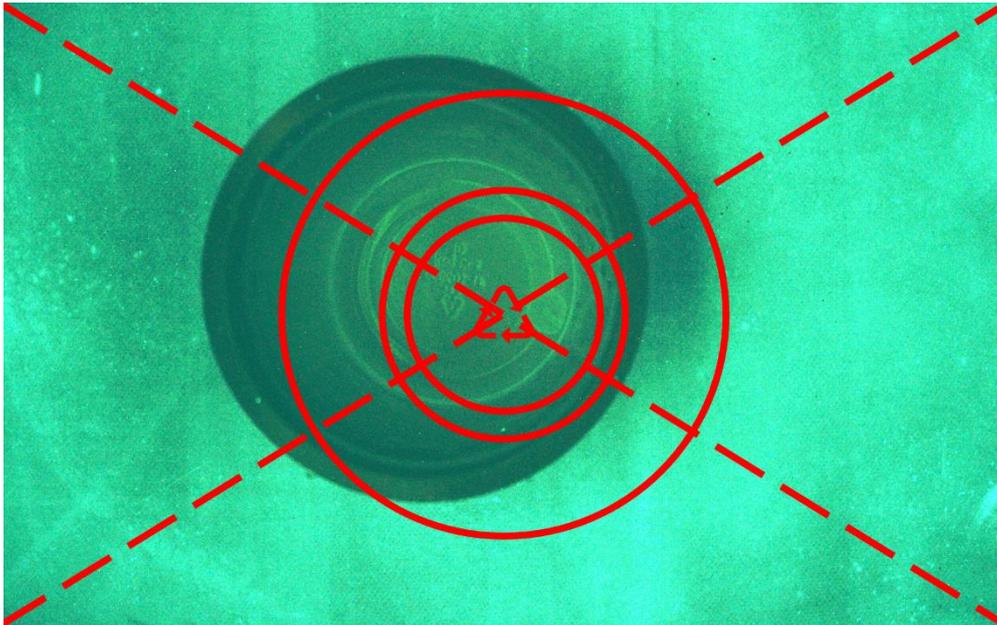
Fig.61 Curva di regressione per la scelta del valore di soglia al variare della concentrazione (A17).

## 4.4 Ottimizzazione del processo

Le immagini dei packaging del dataset mostrano che il contenitore non è posizionato sempre nello stesso modo, sia in termini di centratura sia di orientamento del medesimo. Ciò significa che si sta lavorando in un sistema non ideale, ovvero che le immagini non sono state acquisite a parità di condizioni.

L'assenza di una standardizzazione nel processo di posizionamento del contenitore impedisce l'uso di una "baseline" fissa per l'elaborazione delle immagini. In questo caso la baseline è rappresentata dall'immagine di un

contenitore pulito, non contaminato, chiaramente della stessa tipologia di quelli che si sono utilizzati per il caso di studio. Una baseline fissa è di fondamentale importanza per eseguire operazioni di confronto tra le immagini di packaging contaminati e puliti, come la sottrazione per identificare cambiamenti o anomalie.



*Fig.62 Evidenziazione della centratura e dell'orientamento ideale per le immagini del dataset.*

L'immagine in *Fig.62* evidenzia, in sovrapposizione all'immagine equalizzata di un contenitore con concentrazione dello 0,001%, come dovrebbe essere posizionato il medesimo contenitore all'interno dell'immagine. In particolare, il packaging dovrebbe risultare sempre perfettamente centrato rispetto alle diagonali ed il simbolo del riciclo dovrebbe avere sempre l'orientamento mostrato in figura. Inoltre, a seconda dell'altezza alla quale è stata posizionata la fotocamera e a seconda dello zoom impostato su quest'ultima, le dimensioni del packaging possono variare all'interno dell'immagine

Lavorare con un sistema non ideale in termini di posizionamento del packaging può riflettersi in problematiche relative al rumore e all'illuminazione, influenzando significativamente la qualità della segmentazione delle immagini. In assenza di un'uniformità nel processo di posizionamento del contenitore, certe immagini potrebbero mostrare un contenitore

completamente decentrato; al contrario, altre acquisizioni possono mostrare un packaging perfettamente allineato all'evidenziazione in Fig.61. Una situazione di questo tipo porta al non riuscire a risalire correttamente alla causa di una determinata problematica. Ad esempio, prendendo in considerazione un'immagine con un packaging decentrato come quello in Fig.61, il rumore è unicamente causato dal mal posizionamento o anche dall'illuminazione? Poiché non si sta lavorando in perfetta parità di condizioni tra un'acquisizione e la successiva, non si può rispondere con precisione né con certezza alla domanda formulata.

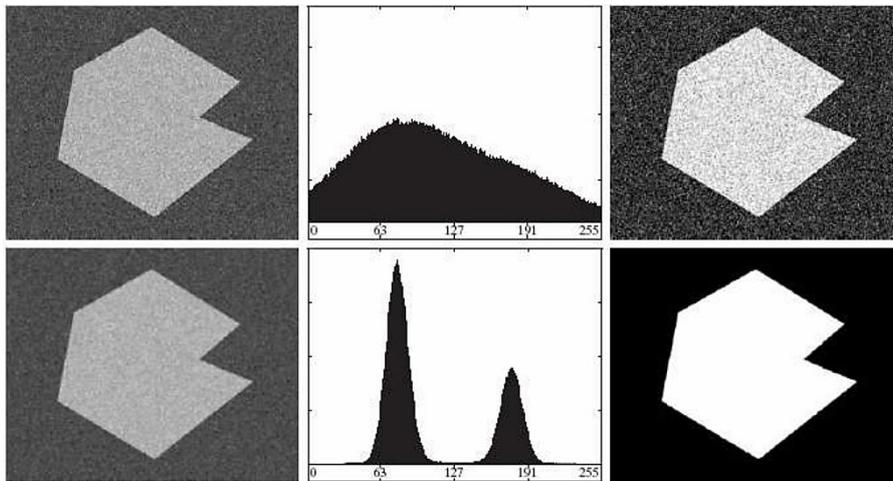


Fig.63 Effetto del rumore nella segmentazione di un'immagine [66].

In Fig.63 è mostrato il ruolo del rumore nel *thresholding* dell'immagine in alto a sinistra. Quest'ultima è immersa in un rumore visibile; i pixel non sono unicamente grigio chiari o grigio scuri, bensì presentano molteplici intensità di colore. L'istogramma relativo alla prima immagine è un singolo picco largo, il quale rappresenta una distribuzione continua dei livelli di grigio. Ciò indica che il rumore ha mescolato i valori di intensità del fondo e della figura, rendendo difficile una segmentazione tramite *thresholding*, nonché la selezione di un efficace valore di soglia. L'immagine segmentata mostra un risultato inadeguato a causa dell'alto livello di rumore. Di conseguenza, la figura non è chiaramente distinguibile e presenta molte imperfezioni.

Nel secondo set di immagini è stato applicato un filtro di *smoothing*, processo che consiste nel “passare” una matrice di valori sopra l'immagine,

ossia nel sostituire il valore di ciascun pixel con una media ponderata dei valori dei pixel circostanti. Dopo l'applicazione del filtro, l'immagine appare più pulita e il rumore significativamente ridotto. L'istogramma della seconda immagine mostra una chiara distribuzione bimodale, con due picchi distinti. Questo indica che i valori di intensità del fondo e della figura sono separabili, facilitando la segmentazione. Infatti, l'immagine risultante dal *thresholding* in basso a destra risulta perfettamente binarizzata, consentendo facilmente di distinguere la figura geometrica dal resto dell'immagine.

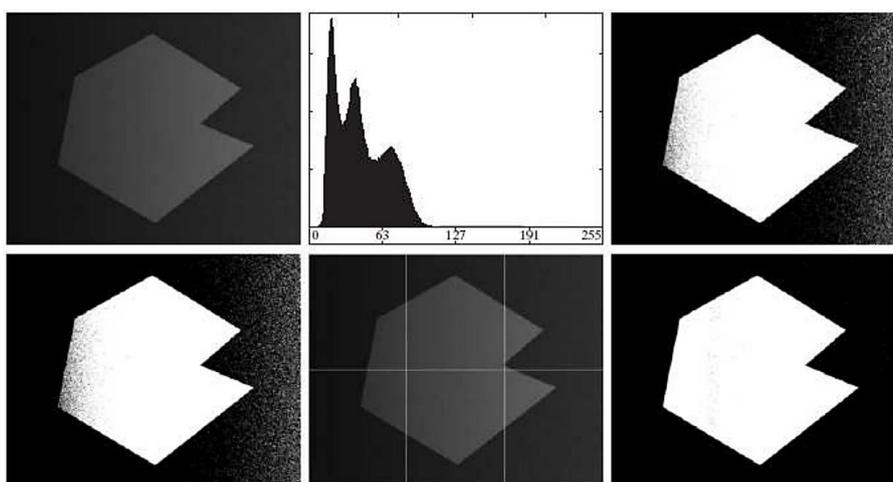


Fig.64 Effetto dell'illuminazione nella segmentazione di un'immagine [66].

In *Fig.64* è rappresentata la stessa figura geometrica della *Fig.63*, con la differenza che in questo caso la problematica non risale in un rumore di fondo nell'immagine, bensì nell'irregolarità dell'illuminazione. La distribuzione della luce non è uniforme, in quanto alcune parti della figura e dello sfondo sono più luminose o più scure rispetto ad altre. L'istogramma relativo alla prima immagine del primo set presenta più picchi, riflettendo la complessità introdotta dall'illuminazione non uniforme. Questa complessa distribuzione dell'istogramma rende difficile scegliere una soglia globale per una segmentazione efficace. La segmentazione globale dell'immagine mostra un risultato inadeguato, come si può notare nella terza immagine del primo set. Le regioni con diversa illuminazione sono mal segmentate, con parte della figura persa e rumore aggiuntivo visibile sul lato destro.

Nel secondo set di immagini, l'immagine iniziale è stata suddivisa in rettangoli non sovrapposti (secondo riquadro). Ogni rettangolo è segmentato individualmente, trattando localmente le variazioni di illuminazione. L'istogramma relativo a ogni singolo rettangolo (non presente in *Fig.64*) mostra una chiara distribuzione bimodale, il che permette di individuare facilmente una soglia che separa i valori di intensità della figura e dello sfondo all'interno di quel rettangolo. L'immagine risultante dalla segmentazione locale mostra una figura geometricamente ben definita; le non uniformità di illuminazione sono state gestite efficacemente partizionando l'immagine e applicando un *thresholding* locale.

L'eliminazione di qualsiasi tipologia di errore dovuta alla mancanza di una procedura operativa standardizzata rappresenta il primo passo verso l'automatizzazione totale del processo di elaborazione di immagini per il caso di studio. Attraverso l'ausilio dell'apprendimento automatico, è possibile far stabilire direttamente ad un sistema di visione artificiale se il contenitore in analisi è pulito o sporco. A partire da un dataset di immagini sufficientemente ampio, si può etichettare manualmente un certo numero di immagini di packaging come "pulito" o "sporco". Dopodiché, la macchina può imparare a riconoscere e distinguere le caratteristiche rilevanti all'interno delle immagini in maniera autonoma. Dunque, una volta addestrato, il sistema di visione artificiale può analizzare le immagini in tempo reale e determinare immediatamente se sono presenti residui o meno.

Efficienza, consistenza e scalabilità sono solo alcuni dei vantaggi che offre l'implementazione di un sistema di visione artificiale al caso di studio. Inoltre, con l'aumentare del numero di immagini analizzate, il modello di machine learning può continuare ad apprendere e migliorare le sue prestazioni. Ogni nuova immagine etichettata correttamente contribuisce a rendere il modello più accurato nel tempo.

In conclusione, un setup sperimentale ben progettato garantisce che le condizioni siano ottimali per l'acquisizione delle immagini da elaborare, minimizzando quindi le problematiche dovute a fattori esterni. In aggiunta, l'ausilio di un sistema di visione artificiale consente di automatizzare la procedura operativa nella sua totalità, garantendo elaborazioni delle immagini rapide e accurate in tempo reale. Questo non solo migliora l'efficienza del processo, ma assicura anche una maggiore consistenza e precisione nei risultati, rivoluzionando quindi il modo in cui le immagini vengono trattate e analizzate.

# Considerazioni finali

Attraverso la procedura operativa applicata al caso di studio che è stato tema di ricerca per questa tesi si è riusciti a mostrare con chiara evidenza la presenza di residui all'interno dei packaging. Le immagini di partenza dei contenitori, ossia quelle non processate tramite i metodi di elaborazione analizzati, non permettevano di identificare "a occhio" le contaminazioni. La potenza di alcune specifiche tecniche di *image processing*, unitamente al metodo UVIFI per l'acquisizione delle immagini, ha permesso di mettere in risalto le zone sporche nei packaging inizialmente non visibili.

Lo scopo di questa analisi è stato, per l'appunto, quello di mostrare una possibile alternativa al test ATP, ampiamente utilizzato nei moderni laboratori per le verifiche di contaminazioni microbiologiche all'interno dei confezionamenti. L'elaborazione delle immagini digitali si rivela un metodo più rapido e, soprattutto, più economico rispetto al test dell'Adenosina Trifosfato. È importante, tuttavia, come sottolineato in conclusione al paragrafo 4.3, lavorare in presenza di un setup sperimentale ottimale. Il sistema di lavoro deve essere "ideale", in quanto deve permettere una certa ripetibilità nei test effettuati, consentendo quindi di lavorare in parità di condizioni in ogni scenario.

L'assenza di un sistema ideale nel setup di partenza non consente di riprodurre di volta in volta con fedeltà i test effettuati, oltre ad ostacolare l'eventuale implementazione di un sistema di visione artificiale. L'avanzare della tecnologia, nello specifico dell'intelligenza artificiale, ha permesso negli ultimi anni di utilizzare i calcolatori come un fondamentale supporto agli operatori in vari settori industriali. Non è da meno il settore del *food packaging*, nel quale l'addestramento delle macchine sul riconoscimento automatico della sporcizia all'interno dei contenitori offrirebbe una grande mano in termini di velocità nell'identificazione delle contaminazioni.

La procedura operativa proposta si pone come un avanzamento del controllo qualità dei packaging. In altri termini, l'adozione di questa serie di operazioni per la verifica della pulizia dei contenitori consente di ottenere un grado di sicurezza e di sostenibilità ulteriore nel mondo dei packaging alimentari. Come analizzato nei primi due capitoli, la sostenibilità è un tema fortemente sentito nei consumatori moderni. In questi termini, il metodo proposto si prefigge il duplice scopo di dare un contributo al mondo della sostenibilità industriale andando a migliorare la fase del controllo qualità dei packaging alimentari.

# Bibliografia

- [1] «Il futuro del packaging ecosostenibile per alimenti: un approfondimento sulla sostenibilità nell'industria alimentare,» LIC Packaging, 2024.
- [2] «Packaging: l'importanza della comunicazione e del design,» Bravo Communications,  
<https://bravocommunications.it/packaging-comunicazione-design-e-marketing/>.
- [3] «Food packaging: una questione di gusto,» Packhelp,  
<https://packhelp.it/design-creativi-per-packaging-alimentare/#:~:text=Il%20packaging%20nasce%20inizialmente%20con,funzione%20pratica%2C%20ma%20anche%20estetica.>
- [4] L. Piergiovanni e S. Limbo, Food packaging – materiali, tecnologie e qualità degli alimenti., Springer, 2010.
- [5] «Guidelines for facilitating the recycling of packaging made predominantly from paper,»  
<https://www.progettarericiclo.com/en/docs/guidelines-facilitating-recycling-packaging-made-predominantly-paper.>
- [6] «Types of Supplies for Packaging your Foods and Drinks,» Packaging Supplies Tips, 2023.  
<http://www.packaging-supplies.com/2023/11/27/types-of-supplies-for-packaging-your-foods-and-drinks/>.
- [7] «I principali adempimenti per le imprese alimentari,» Camera di Commercio Industria Artigianato e Agricoltura di Torino, 2021.
- [8] CORDIS, «Combattere l'inquinamento da plastica con alternative a base biologica,» Commissione Europea, 2024.
- [9] «La riduzione degli sprechi alimentari al centro dell'impegno di Tetra Pak,» Restart in Green, 2024.  
<https://restartingreen.it/riciclaggio/la-riduzione-degli-sprechi-alimentari-al-centro-dellimpegno-di-tetra-pak/>.

- [10] «Sui materiali e gli oggetti destinati a venire a contatto con i prodotti alimentari,» Parlamento europeo e del Consiglio.
- [11] ASSICA, «Food packaging: imballaggi sostenibili e nuovi scenari.,» 2023.  
[https://issuu.com/associazione\\_assica/docs/idc\\_maggio\\_2023-\\_book\\_-\\_online\\_low/s/24700039,.](https://issuu.com/associazione_assica/docs/idc_maggio_2023-_book_-_online_low/s/24700039,.)
- [12] S. De La Feld, «I rifiuti da imballaggi sono ovunque. 84 milioni di tonnellate prodotte in Ue nel 2021.,» EUNews, 2023.  
[https://www.eunews.it/2023/10/19/rifiuti-imballaggi-ue-2021/.](https://www.eunews.it/2023/10/19/rifiuti-imballaggi-ue-2021/)
- [13] L. Foltran, «Dall'Europa nuove norme per gli imballaggi: stop allo spreco, più riutilizzo e riciclaggio.,» Il Fatto Alimentare,  
<https://ilfattoalimentare.it/europa-nuove-norme-per-gli-imballaggi-stop-allo-spreco-piu-riutilizzo-e-riciclaggio.html>.
- [14] Global Food Packaging Market Size By Material (Plastics, Metal), By Product Type (Flexible, Rigid), By Application (Confectionery, Convenience Foods), By Geographic Scope And Forecast, Verified Market Research, 2024.
- [15] Riduzione dei consumi e riciclo della plastica: 5 misure immediatamente attuabili, ECCO Climate, 2022.
- [16] «Smart Packaging vs. Connected Packaging: What's the Difference?,» TouchCode,  
[https://touchcode.com/smart-packaging-vs-connected-packaging/.](https://touchcode.com/smart-packaging-vs-connected-packaging/)
- [17] M. A. G. Benedetta Mainardi, «Packaging attivo, intelligente o smart per allungare la shelf-life dei prodotti.,» 2019.  
[https://www.italiaatavola.net/horeca/2019/2/9/packaging-attivo-intelligente-smart-allungare-shelf-life-dei-prodotti/59244/.](https://www.italiaatavola.net/horeca/2019/2/9/packaging-attivo-intelligente-smart-allungare-shelf-life-dei-prodotti/59244/)
- [18] C. d. Vedova, «Packaging intelligenti: il potere delle confezioni,» 2018.  
[https://www.cristiandellavedova.com/packaging-intelligenti-il-potere-delle-confezioni/.](https://www.cristiandellavedova.com/packaging-intelligenti-il-potere-delle-confezioni/)

- [19] «Cos'è l'economia circolare,»  
<https://economiecircolare.com/cose-economia-circolare/>.
- [20] «In poche parole,» Italia Circolare,  
<https://www.italiacircolare.it/it-it/in-poche-parole-v1.aspx>.
- [21] «Economia lineare vs economia circolare: modello del futuro,»  
<https://www.economiaefinanza.net/economia-lineare-vs-economia-circolare/>.
- [22] E. T. Amundi, «Investire nell'Economia Circolare: chiudere il cerchio,» 2021. [Online].
- [23] Strategia nazionale per l'economia circolare, 2022: Ministero della Transizione Ecologica.
- [24] A. Tomasi, Rivoluzione verde e transizione ecologica. Obsolescenza programmata e sua "insostenibilità", 2016.
- [25] Kaza, Silpa, Yao, Lisa C., Bhada-Tata, Perinaz, Van Woerden e Frank, What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050., World Bank Group, 2018, 2018.
- [26] «La plastica: un confronto tra sostenibilità ed inquinamento ambientale,» Colmare, 2022.  
<https://colmare.altervista.org/la-plastica-sostenibilita-e-inquinamento/>.
- [27] M. England e K. G. Vilholth, Acque sotterranee e settore agricolo, UNESCO, 2022.
- [28] ZeroSprechi, «Cos'è l'economia circolare,»  
<https://www.zerosprechi.eu/index.php/cos-e-l-economia-circolare>.
- [29] D. D. Valentina, Economia circolare: dalla concettualizzazione alla misurazione., Spinoff, 2022.
- [30] E. Ronchi, Il riciclo in Italia, Fondazione per lo sviluppo sostenibile, 2022.

- [31] H. Markus, «Che cos'è la produzione sostenibile e come la trasformazione digitale può sostenere uno sviluppo industriale sostenibile.», PTC,  
<https://www.ptc.com/it/blogs/corporate/trasformazione-digitale-produzione-sostenibile>.
- [32] E. P. Giorgio De Pasquale, «Veicoli elettrici ed economia circolare, come fronteggiare la sfida della sostenibilità?», Meccanica News, 2023.  
<https://www.meccanicanews.com/2023/09/14/veicoli-elettrici-ed-economia-circolare-come-fronteggiare-la-sfida-della-sostenibilita/>.
- [33] «Le figure professionali più richieste nella Green Economy», GEMA Business School,  
<https://www.gema.it/blog/gema-news/le-figure-professionali-piu-richieste-nell-ambito-dell-economia-verde-e-circolare/>.
- [34] «Simbolo di riciclaggio», Wikipedia,  
[https://it.wikipedia.org/wiki/Simbolo\\_di\\_riciclaggio#:~:text=Il%20simbolo%20di%20riciclaggio%20\(%E2%99%B2,fo rmano%20un%20nastro%20di%20M%C3%B6bius..](https://it.wikipedia.org/wiki/Simbolo_di_riciclaggio#:~:text=Il%20simbolo%20di%20riciclaggio%20(%E2%99%B2,fo rmano%20un%20nastro%20di%20M%C3%B6bius..)
- [35] Il ruolo della termovalorizzazione nell'economia, Gazzetta ufficiale dell'Unione Europea, 2018.
- [36] Corte dei Conti Europea, Economia circolare: nonostante l'azione dell'UE, la transizione negli Stati membri procede lentamente, 2023.
- [37] Tondo, «Che cos'è il cradle-to-cradle design?»,  
<https://www.tondo.tech/it/divulgazione-e-risorse/blog/che-cose-il-cradle-to-cradle-design/>.
- [38] «Le fasi di un LCA», BGT,  
<https://bgreen.tech/green-economy/lca/fasi-lca/>.
- [39] Position Paper 2020, Alleanza per l'economia circolare.
- [40] «I consumi al bivio della circolarità». *5° Rapporto sull'Economia Circolare in Italia*.

- [41] Celvil, «Plastica per alimenti,»  
<https://www.celvil.it/normativa/plastica-packaging-alimentare/>.
- [42] Comunicazione della commissione al Parlamento Europeo, al Consiglio, al Comitato Economico e Sociale Europeo e al Comitato delle Regioni: Strategia europea per la plastica nell'economia circolare, 2018.
- [43] L'economia circolare nelle filiere industriali: il caso Plastiche, 2021: ICESP.
- [44] «Estrusione Film,» EuroChiler,  
<https://www.eurochiller.com/applicazioni/plastica/estrusione-film/>.
- [45] «Vuoto a rendere: grazie all'Europa, forse, arriva anche in Italia,» Il Fatto Alimentare,  
<https://ilfattoalimentare.it/vuoto-a-rendere-grazie-alleuropa-arriva-forse-anche-in-italia.html>.
- [46] «Industrial tray washer for distribution, logistics & fulfillment centers,» Better Engineering,  
<https://www.betterengineering.com/logistics-distribution-tray-washer/>.
- [47] U. Sozzo, «Indagini microbiologiche delle superfici: quali strumenti utilizzare?,» AriaSicura,  
<https://www.ariasicura.it/indagini-microbiologiche-delle-superfici/>.
- [48] «How clean is your clean?,» Clean Compliance,  
<https://cleancompliance.com.au/>.
- [49] «Spettroscopia nel medio e vicino infrarosso a trasformata di Fourier in riflessione MID-FTIR (MIR) e NEAR-FTIR (NIR),» Futurahma,  
<https://www.futurahma.it/metodologie-impiegate/spettroscopia-infrarossa-a-trasformata-di-fourier-nel-medio/>.
- [50] E. Woolley, N. Samsun, A. Simeone, L. Kye e W. Garrath T., A circular economy for reusable plastic packaging: digital assessment for cleaning assurance, ScienceDirect, 2024.

- [51] «Introduction to Peel Tests (2) “45 Degree Peel Test / T Peel Test”,» ForceChannel, 2023.  
[https://force-channel.com/en/post\\_1495/](https://force-channel.com/en/post_1495/).
- [52] «A Guide to Mechanical Testing of Paper and Plastic Packaging Materials,» Quality Magazine,  
<https://www.qualitymag.com/articles/96591-a-guide-to-mechanical-testing-of-paper-and-plastic-packaging-materials>.
- [53] R. Casper e E. Sundin, «Reverse Logistic Transportation and Packaging Concepts in Automotive Remanufacturing,» ScienceDirect, 2018.
- [54] «Reverse logistics: quali sono i vantaggi della logistica inversa,» LamGate,  
<https://www.lamgate.it/reverse-logistics-quali-sono-i-vantaggi-della-logistica-inversa/>.
- [55] «The rising global market of sustainable packaging,» The Green Solutions,  
<https://thegreensolutions.net/p/the-rising-global-market-of-sustainable>.
- [56] «Plastica e nuovi materiali plastici: un’alternativa compostabile,» ITSCOMPOSTABLE,  
<https://www.itscompostable.com/anche-loro-sono-compostabili/bioplastica-e-nuovi-materiali-plastici-alternativa-compostabile/#:~:text=Il%20primo%20grande%20vantaggio%20dell,di%20CO2%20sul%20nostro%20pianeta>.
- [57] «Bioplastica per alimenti, pro e contro,» Ekoe,  
<https://www.ekoe.org/bioplastica/>.
- [58] «PLA Acido Polilattico il polimero delle stoviglie biodegradabili,» Ekoe,  
<https://www.ekoe.org/pla-acido-polilattico-il-polimero-delle-stoviglie-biodegradabili/>.
- [59] C. M. H. Aeschelmann F., Bio-based Building Blocks and Polymers – Global Capacities and Trends 2016-2021, Nova-Institut GmbH, 2017.

- [60] «Il futuro del packaging alimentare: nuovi materiali, riutilizzo e riciclo.» Radio Città Fujiko,  
<https://www.radiocittafujiko.it/il-futuro-del-packaging-alimentare-nuovi-materiali-riutilizzo-e-riciclo/>.
- [61] «Etichettare gli imballaggi in plastica: obblighi e consigli,» EllePack,  
<https://www.ellepack.it/etichettare-gli-imballaggi-plastica-obblighi-e-consigli/>.
- [62] G. V. Mendonça e E. A. da Silva, Digital Image Processing., Academic Press, 2015.
- [63] «Scala di grigi del vulcano,» Vecteezy,  
<https://it.vecteezy.com/foto/1229712-in-scala-di-grigi-of-vulcano>.
- [64] Wikipedia, «Elaborazione digitale delle immagini,»  
[https://it.wikipedia.org/wiki/Elaborazione\\_digitale\\_delle\\_immagini](https://it.wikipedia.org/wiki/Elaborazione_digitale_delle_immagini).
- [65] A. Coste, «Project 1: Histograms - CS6640 Image Processing,» University of Utah, 2012.
- [66] R. C. Gonzalez e R. E. Woods, Elaborazioni delle immagini digitali, Pearson Italia, 2008.
- [67] «Sightline IL-Series Vision Inspection System,» KPM,  
<https://www.kpmanalytics.com/products/vision/sightline-il-series-vision-inspection-system>.
- [68] R. H. Elliot Woolley, Cleaning Assurance for Reusable Plastic Packaging using Ultraviolet Induced Fluorescence, Loughborough University, 2019.
- [69] «Pigments through the ages. Ultraviolet (UV) lights.,»  
<https://www.webexhibits.org/pigments/intro/uv.html>.
- [70] S. Krig, Computer Vision Metrics: Survey, Taxonomy, and Analysis, Apress Open, 2014.
- [71] «Operazioni sulle immagini digitali,» Università degli studi di Cassino,  
<https://webuser.unicas.it/tortorella/TTII/PDF2004/operatori%20puntuali.pdf>.

## Appendice A1

Per la binarizzazione dell'immagine in *Fig.30* è stato utilizzato il seguente codice MATLAB.

```
% Conversione dell'immagine in scala di grigi
grayImg = rgb2gray(img);
% Definizione della soglia
threshold = 128;
% Applicazione la soglia
binaryImg = grayImg > threshold;
% Visualizzazione dell'immagine binarizzata
imshow(binaryImg)
```

L'immagine di partenza è rappresentata dalla variabile `img`.

La soglia è definita dalla variabile `threshold` e può assumere come valore qualsiasi numero intero da 0 a 256. Si è scelto un valore intermedio unicamente per mostrare un esempio della modalità di esecuzione dell'operazione di sogliatura.

## Appendice A2

Per la creazione dell'istogramma in *Fig.41* è stato utilizzato il seguente codice MATLAB.

```
figure;  
imhist(MAYO1).
```

Si consideri che l'immagine di partenza è definita dalla variabile `MAYO1`. L'asse  $x$  rappresenta l'intensità dei pixel mentre l'asse  $y$  il numero di pixel. La funzione `imhist` converte automaticamente l'immagine in input in scala di grigi (*greyscale*). Sotto l'asse delle ascisse è, infatti, mostrata una barra che permette di visualizzare per ogni singola tonalità di grigio la frequenza nelle ordinate, ossia il numero di pixel che nell'immagine presentano quel livello di intensità.

## Appendice A3

Per la creazione dell'istogramma in *Fig.42* è stato utilizzato il seguente codice MATLAB.

```
% L'immagine è in scala di grigi?
if size(MAYO1, 3) == 3
    grayImage = rgb2gray(MAYO1);
else
    grayImage = MAYO1;
end

% Calcolo dell'istogramma
[counts, binLocations] = imhist(grayImage);

% Calcolo della CDF
cdf = cumsum(counts) / numel(grayImage);

% Visualizzazione della CDF
figure;
plot(binLocations, cdf, 'LineWidth', 2);
grid on;
```

L'immagine con cui si sta lavorando è la medesima dei precedenti codici, ovvero la variabile rappresentata da MAYO1.

Il grafico risultante mostra la funzione di distribuzione cumulativa (*Cumulative Distribution Function*), abbreviata in CDF.

Nella CDF, sull'asse delle ascisse sono rappresentati i livelli di intensità dei pixel, mentre sulle ordinate sono rappresentate le probabilità cumulative di trovare un pixel con un'intensità minore o uguale a un determinato valore.

## Appendice A4

Per l'equalizzazione dell'immagine applicata all'immagine in *Fig.41* è stato implementato il seguente codice MATLAB.

```
% Equalizzazione dell'istogramma
img_equalizzata = histeq(MAYO1);

% Visualizzazione dell'immagine equalizzata
figure
imshow(img_equalizzata); title('Immagine equalizzata').
```

L'operazione di equalizzazione tramite istogramma è stata svolta mediante la funzione `histeq` applicata alla variabile `MAYO1`.

Con questo algoritmo si ottiene il primo risultato concernente la procedura operativa per il rilevamento dei residui di maionese nei packaging del caso di studio. L'immagine risultante è stata chiamata `img_equalizzata` e verrà richiamata nello stesso modo nei codici che la richiedono.

## Appendice A5

Per l'ottenimento dell'istogramma presente in *Fig.43* si è applicata la funzione di calcolo dell'istogramma `imhist` applicata all'immagine equalizzata ottenuta dal codice in (A4) `img_equalizzata`.

```
figure;  
imhist(img_equalizzata).
```

In questo modo è stato ottenuto un istogramma con i livelli di intensità dei pixel ridistribuiti secondo la CDF di cui in (A3).

## Appendice A6

Per l'estrazione dei canali di tonalità, saturazione e luminosità dall'immagine equalizzata in *Fig.44* è stato utilizzato il seguente codice su MATLAB.

```
% Conversione dell'immagine dallo spazio RGB allo spazio HSV
hsv_img = rgb2hsv(img_equalizzata);

% Estrazione dei singoli canali HUE, SATURATION e VALUE
hue_channel = hsv_img(:,:,1);
saturation_channel = hsv_img(:,:,2);
value_channel = hsv_img(:,:,3);

% Visualizzazione dei canali HUE, SATURATION e VALUE
figure;

imshow(hue_channel);

imshow(saturation_channel);

imshow(value_channel).
```

La funzione `rgb2hsv` consente di convertire l'immagine dallo spazio colore RGB a quello HSV. Tramite `imshow` si possono visualizzare i tre canali.

## Appendice A7

Per l'ottenimento dell'immagine in *Fig.48* si è implementato il seguente codice su MATLAB.

```
% Test per verificare che l'immagine che sia a colori
if size(img_equalizzata, 3) == 3
    % Estrazione del canale verde
    green_channel = img_equalizzata (:,:,2);

    % Visualizzazione del solo canale verde
    figure;
    imshow(green_channel);
else
    error('L''immagine non è a colori.');
```

Con questo codice si visualizza il solo canale verde dell'immagine equalizzata (*img\_equalizzata*), il quale costituisce la base per effettuare l'operazione di sottrazione del canale *Value*.

## Appendice A8

Per l'ottenimento degli istogrammi in *Fig.49* è stato applicato il seguente codice MATLAB, che si basa sul codice già mostrato in (A2) per il calcolo di un'istogramma.

```
% Calcolo dell'istogramma del canale verde
hist_verde = imhist(canale_verde);

% Calcolo dell'istogramma del canale di luminosità (VALUE)
hist_value = imhist(canale_value);

% Visualizzazione degli istogrammi
figure;
subplot(1, 2, 1);
bar(hist_verde);

subplot(1, 2, 2);
bar(hist_value).
```

Grazie a `subplot` è possibile visualizzare i due istogrammi affiancati in un'unica immagine.

## Appendice A9

Per l'ottenimento dell'immagine preprocessata in *Fig.50* si è usato il codice MATLAB che segue.

```
% Estrazione del canale verde dall'immagine img_equalizzata
canale_verde = img_equalizzata(:,:,2);

% Conversione dell'immagine in formato HSV
img_equalizzata_hsv = rgb2hsv(img_equalizzata);

% Estrazione del canale V dall'immagine HSV
V = img_equalizzata_hsv(:,:,3);

% Sottrazione del canale V dal canale verde
nuovo_canale_verde = max(double(canale_verde)/255 - dou-
ble(V)/255, 0); % Canale verde - Valore (V)

% Ricostruzione dell'immagine HSV con il nuovo canale verde
nuova_immagine_hsv = cat(3, img_equalizzata_hsv(:,:,1),
nuovo_canale_verde, img_equalizzata_hsv(:,:,3));

% Conversione dell'immagine risultante in formato RGB
nuova_immagine_RGB = hsv2rgb(nuova_immagine_hsv);

% Visualizzazione dell'immagine risultante
imshow(nuova_immagine_RGB), title('Canale Verde - Canale
V').
```

Questo codice permette di ottenere l'output risultante dalla seconda operazione di *preprocessing* della procedura, `nuova_immagine_RGB`.

## Appendice A10

Per l'immagine in *Fig.51* è stato usato il seguente codice MATLAB, seguendo quanto implementato in (A2), (A4) e (A9).

```
% Calcolo degli istogrammi delle immagini
hist_eq = imhist(rgb2gray(img_equalizzata));
hist_new = imhist(rgb2gray(nuova_immagine_RGB));

% Normalizzazione degli istogrammi
hist_eq = hist_eq / sum(hist_eq);
hist_new = hist_new / sum(hist_new);

% Visualizzazione degli istogrammi a confronto
figure;
subplot(1, 2, 1);
bar(hist_eq, 'b');

subplot(1, 2, 2);
bar(hist_new, 'b').
```

## Appendice A11

Per l'immagine risultante in *Fig.53* si è usato il seguente codice MATLAB.

```
% Conversione dell'immagine in scala di grigi
if size(img, 3) == 3
    gray_image = rgb2gray(cdata);
else
    gray_image = cdata;
end

% Calcola del valore della soglia
threshold = (min(gray_image(:)) + max(gray_image(:))) / 2;

% Binarizzazione dell'immagine usando la soglia scelta
binary_image = gray_image > threshold;

% Visualizzazione dell'immagine binarizzata
imshow(binary_image).
```

Per l'operazione si è utilizzata l'immagine del packaging isolato in *Fig.52*, definita nel codice dalla variabile `img`. Il valore della soglia è stato impostato come la media tra il valore minimo e massimo di intensità dei pixel nell'immagine.

## Appendice A12

Per l'ottenimento dell'immagine in *Fig.54* è stato applicato l'algoritmo del metodo di Otsu su MATLAB.

```
% Conversione dell'immagine in scala di grigi
if size(img, 3) == 3
    gray_image = rgb2gray(cdata);
else
    gray_image = cdata;
end

% Utilizzo del metodo di Otsu per ottenere la soglia ottimale
threshold = graythresh(gray_image);

% Binarizzazione dell'immagine usando la soglia ottenuta
binary_image = imbinarize(gray_image, threshold);

% Visualizzazione l'immagine binarizzata
imshow(binary_image).
```

L'algoritmo è stato applicato all'immagine in *Fig.52*, definita nel programma dalla variabile `img`.

## Appendice A13

Per l'acquisizione dell'immagine in *Fig.55* si è utilizzato il codice MATLAB qui di seguito.

```
img_gray = rgb2gray(img);

% Applicazione della segmentazione a soglia adattiva locale
bw_maionese = imbinarize(img_gray, 'adaptive', 'Sensitivity',
0.5);

% Evidenziazione dei residui sull'immagine originale
img_highlighted = img;
img_highlighted(repmat(~bw_maionese, [1 1 3])) = 255;
% Sovrappone i residui di maionese sull'immagine originale

% Visualizzazione dell'immagine evidenziata
figure;
imshow(img_highlighted).
```

L'immagine risultante, `img_highlighted`, rappresenta il primo step di *image analysis* della procedura operativa. Permette di avere una prima evidenziazione dei residui di maionese alla base del contenitore.

## Appendice A14

Per l'immagine in *Fig.56* è stato usato il seguente codice MATLAB.

```
% Scelta del generatore di numeri casuali
seed = 18; % Inserimento di un qualsiasi valore intero
rng(seed);

% Estrazione dei canali di colore RGB
R = img_highlighted (:,:,1);
G = img_highlighted (:,:,2);
B = img_highlighted (:,:,3);

% Concatenazione dei canali di colore in un'unica
matrice per l'analisi dell'istogramma
color_data = [R(:), G(:), B(:)];

% Analisi dell'istogramma per trovare cluster di colore
num_clusters = 3; % Numero di cluster desiderati
[idx, centers] = kmeans(double(color_data),
num_clusters);

% Assegnazione di etichette ai pixel in base ai cluster
segmented_img = reshape(idx, size(img_highlighted,1),
size(img_highlighted,2));

% Visualizzazione dell'immagine segmentata
figure;
imagesc(segmented_img);
colormap('jet');
colorbar.
```

Per garantire coerenza e riproducibilità del codice è stato utilizzato un generatore di numeri casuali, definito dalla funzione `rng`. La variabile `seed` si riferisce al seme utilizzato per inizializzare il generatore di numeri casuali, nonché l'assegnazione dei centroidi. Ciò assicura che, ogni qual volta si esegua il codice col medesimo seme, si ottenga la stessa sequenza di numeri casuali e, quindi, gli stessi risultati di *clustering*.

Il codice fornisce l'immagine relativa all'ultimo step della procedura operativa, restituendo una visualizzazione dei residui ancora più netta.

## Appendice A15

Per l'isolamento dei pixel in *Fig. 58* è stato applicato il codice MATLAB che segue.

```
% Estrazione dei canali di colore dall'immagine
R = segmented_img(:,:,1);
G = segmented_img(:,:,2);
B = segmented_img(:,:,3);

% Ricerca dei pixel rossi
pixelRossi = (R > G) & (R > B);

% Creazione di un'immagine che mostri solo i pixel rossi
soloPixelRossi = uint8(zeros(size(segmented_img)));
soloPixelRossi(:,:,1) = R .* uint8(pixelRossi); % Canale
rosso
soloPixelRossi(:,:,2) = G .* uint8(pixelRossi); % Canale
verde
soloPixelRossi(:,:,3) = B .* uint8(pixelRossi); % Canale blu

% Visualizzazione dei soli pixel rossi
imshow(soloPixelRossi).
```

La variabile `segmented_img` nel codice si riferisce all'immagine post-clustering, secondo (A14).

## Appendice A16

Per la sogliatura globale in *Fig.60* è stato applicato il seguente codice di binarizzazione su MATLAB.

```
% Conversione dell'immagine in scala di grigi
if size(cdata, 3) == 3
    grayImage = rgb2gray(cdata);
else
    grayImage = cdata;
end

% Visualizzazione dell'immagine originale
figure;
imshow(grayImage);
title('Immagine Originale');

% Impostazione della soglia
threshold = 90;

% Binarizzazione dell'immagine
binaryImage = grayImage > threshold;

% Visualizzazione dell'immagine binarizzata
figure;
imshow(binaryImage).
```

In questo caso il valore di soglia, definito dalla variabile `threshold`, è stato impostato a 90, in quanto è risultato il valore ottimale per il packaging avente una concentrazione di residui di maionese pari al 20%.

## Appendice A17

Per l'ottenimento della curva di regressione presente nell'immagine in *Fig.61* è stato usato il codice MATLAB che segue.

```
% Dati di input
concentration = [5, 10, 20, 50];
threshold = [8, 30, 90, 155];

% Grado del polinomio
degree = 2;

% Calcolo dei coefficienti del polinomio di grado 2
coefficients = polyfit(concentration, threshold, de-
gree);

% Visualizzazione dei coefficienti
disp('Coefficients of the polynomial:');
disp(coefficients);

% Verifica della relazione
concentration_fit = linspace(min(concentration),
max(concentration), 100);
threshold_fit = polyval(coefficients, concentra-
tion_fit);

% Visualizzazione grafico dei dati e del polinomio fit
figure;
plot(concentration, threshold, 'o', 'MarkerSize', 8,
'DisplayName', 'Dati');
hold on;
plot(concentration_fit, threshold_fit, '-', 'LineWidth',
2, 'DisplayName', 'Polinomio di Fit');
xlabel('Concentration');
ylabel('Threshold');
grid on.
```

## Appendice A18

Per la creazione della “maschera” (cornice nera) al contorno del fondo del packaging è stato implementato il seguente codice su MATLAB.

```
% Creazione di una cornice di 100 pixel attorno a img
cornice_spessore = 100; % Lato della cornice

% Aggiunta della cornice nera all'img
soloPixelRossi(1:cornice_spessore, :, :) = 0; % Bordo
superiore
soloPixelRossi(end-cornice_spessore+1:end, :, :) = 0; %
Bordo inferiore
soloPixelRossi(:, 1:cornice_spessore, :) = 0; % Bordo
sinistro
soloPixelRossi(:, end-cornice_spessore+1:end, :) = 0; %
Bordo destro

% Visualizzazione dell'immagine con la cornice nera
figure;
imshow(soloPixelRossi);
title('Immagine con Cornice Nera di 100 Pixel');
```

L'immagine di partenza è definita dalla variabile `soloPixelRossi`. Attorno a questa viene creata una cornice nera di forma quadrata e di lato variabile. In ogni acquisizione il packaging è posizionato diversamente e, talvolta, anche la distanza dall'obiettivo è differente. In tal senso, non è possibile stabilire una cornice “fissa” ottimale per ogni immagine in input. Ogni caso è a sé stante, perciò si sceglie il lato della cornice in modo tale che vengano esclusi tutti i pixel che riguardano zone in cui non vi sono sicuramente contaminazioni.