

# Ottimizzazione della riproduzione dei grigi nei processi di stampa CMYK

Autore: Alessandro Beltrami  
Tutor: Lourdes Meler Corretjé  
Professore: Jose Antonio Moran Moreno

Laurea in Ingegneria delle Tecnologie e Servizi delle Telecomunicazioni  
Applicazioni multimediali basate nella elaborazione dei segnali

1/2022

## **TRADUZIONE NON UFFICIALE IN LINGUA ITALIANA EFFETTUATA DALL'AUTORE**

Con il fine di rimanere il più possibile fedele alla versione originale, la struttura delle frasi è stata adattata solo quando necessario alla comprensione del testo. Lo stile, pertanto, risente dell'impostazione originale anglosassone.

Versione ufficiale in lingua Inglese:

<http://hdl.handle.net/10609/138386>

I fogli di calcolo e i dati utilizzati possono essere scaricati da GitHub:

<https://github.com/abeltrami/grey-optimization-thesis>



Questo lavoro è soggetto a licenza

Creative Commons Attribuzione-Condividi allo stesso modo 4.0 Internazionale.

<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.it>

A Nillo, perché aveva ragione.

Sentiti ringraziamenti a Elia Nardini di corGae sas per aver gentilmente fornito in utilizzo la stampante digitale industriale con carta e consumabili.

Grazie a HP Inc., in particolare a Marc Jansa e Konstantinos Kontonikolas, per aver supportato il mio percorso di Laurea e aver fornito in utilizzo i dispositivi di misura e di valutazione visiva.

Grazie a Giovanni Daprà, Andreas Kraushaar, Bruno Mortara, Nikolaus Pfeiffer, per l'aiuto fornito nell'integrazione della bibliografia.

Grazie a TAGA Italia per il supporto e l'ispirazione.

# Riassunto

La stampa delle tonalità di grigio è una sfida per quasi tutte le tecnologie di stampa: molti fattori devono essere tenuti sotto controllo per consentire una riproduzione coerente dei grigi neutri, tra cui la correlazione con il sistema di visione umana. Lo scopo del progetto è quello di descrivere e applicare lo stato dell'arte del bilanciamento dei grigi neutri e la calibrazione della riproduzione in un processo di stampa industriale generico a quattro colori CMYK a mezzitoni. Viene applicato un metodo di calibrazione in tre fasi compatibile con lo standard ISO 12647-2 e in grado di ottenere una condizione di bilanciamento del grigio neutro, ispirato al metodo G7™, focalizzato sul caso d'uso quando si parte da una caratterizzazione arbitraria. Il test è stato effettuato utilizzando una macchina da stampa industriale HP Indigo su carta patinata lucida, calibrata in base alle condizioni di stampa FOGRA51 e messa a punto per la riproduzione del bilanciamento del grigio utilizzando le misurazioni di uno spettrofotometro automatico. La formula colorimetrica Grey Index (GI) è stata utilizzata per valutare il risultato, supportata da una sessione di valutazione visiva in una condizione standard.

I risultati mostrano un miglioramento del GI da 2,82 nel caso di stampante non calibrata, a 1,16 utilizzando la calibrazione TVI standard, a 0,61 della calibrazione ottimizzata dei grigi: la valutazione visiva concorda con i risultati. Questa è una dimostrazione che il metodo funziona, ma sono necessari ulteriori test per convalidare il processo e affinare la correlazione della formula del Grey Index con valutazioni visive in più tecnologie di stampa e tipi di substrato cartaceo.

## Parole chiave

Stampa, CMYK, bilanciamento dei grigi, riproduzione dei grigi, TVI, Grey Index, Gray Index.



# Indice

<b>1.</b>	<b>Introduzione.....</b>	<b>6</b>
1.1.	Descrizione del progetto .....	6
1.2.	Giustificazione .....	7
1.3.	Motivazione .....	8
1.4.	Scopo .....	8
1.5.	Obiettivi.....	8
1.6.	Dispositivi.....	9
1.6.1.	Tecnologia di stampa.....	9
1.6.2.	Strumenti di misura .....	9
1.7.	Metodologia.....	11
1.8.	Pianificazione.....	13
1.9.	Struttura del resto del documento .....	16
<b>2.</b>	<b>Stato dell'arte.....</b>	<b>17</b>
2.1.	Origine della stampa dei grigi.....	17
2.2.	La fotografia e il Sistema delle Zone.....	18
2.3.	Fisica e colorimetria dei colori grigi .....	19
2.3.1.	Colorimetria .....	19
2.3.2.	Adattamento cromatico.....	22
2.4.	Cenni sulla separazione dei colori del processo di stampa CMYK.....	23
2.5.	Il valore dell'incremento tonale .....	26
2.6.	Il grigio nell'era della stampa moderna .....	29
2.7.	Definizione di grigio .....	30
2.8.	Il bilanciamento del grigio nel contesto della stampa .....	33
2.9.	Riproduzione dei grigi in stampa .....	35
2.10.	Il metodo G7.....	36
2.10.1.	Definizione dei grigi .....	36
2.10.2.	Bilanciamento dei grigi.....	37
2.10.3.	Calibrazione .....	38
2.11.	Il metodo TVI.....	38
2.12.	Differenze tra i metodi G7 e TVI.....	41
<b>3.</b>	<b>Disegno e Implementazione .....</b>	<b>44</b>

<b>3.1. Processo di calibrazione .....</b>	<b>44</b>
<b>3.2. Definizione dei grigi .....</b>	<b>45</b>
<b>3.3. Calibrazione .....</b>	<b>49</b>
3.3.1. La forma test .....	49
3.3.2. Calibrazione TVI .....	52
3.3.3. Messa a punto della riproduzione dei grigi.....	56
<b>3.4. Valutazione della riproduzione dei grigi.....</b>	<b>66</b>
3.4.1. Grey Index .....	67
<b>3.5. Valutazione visiva.....</b>	<b>69</b>
<b>4. Conclusioni e lavoro futuro .....</b>	<b>71</b>
<b>4.1. Conclusioni .....</b>	<b>71</b>
<b>4.2. Lavoro futuro .....</b>	<b>72</b>
<b>Bibliografia.....</b>	<b>73</b>
<b>Allegati.....</b>	<b>75</b>

# Tabella dei contenuti

## Indice delle figure

Figura 1 – La HP Indigo 12000 HD di corGae sas, Italia.....	9
Figura 2 - X-Rite eXact™ spettrofotometro portatile .....	10
Figura 3 - Spettrofotometro Konica Minolta FD-9.....	11
Figura 4 - Work Breakdown Structure .....	13
Figura 5 – Diagramma di GANTT.....	14
Figura 6 - Relazione di progetto alla fine dei lavori .....	15
Figura 7 - Pagina da Biblia Pauperum, secolo XV .....	17
Figura 8 - Burgkmair H., Lovers Surprised by Death, 1510.....	18
Figura 9 - Ugo da Carpi – Sibilla che legge – intaglio in legno originale 1510-15 ca., foto di una riproduzione datata 1520-27 ca. ....	18
Figura 10 - L'equivalenza di zone, letture di esposizione, f/stop, velocità dell'otturatore e numeri ASA (17 p. 31). ....	18
Figura 11 - Ansel Adams, The Tetons and the Snake River, 1942, esempio di una foto perfettamente bilanciata che copre tutte le zone del Sistema a Zone (1).....	19
Figura 12 - Confronto tra le distribuzioni spettrali D50 e D65 da <a href="https://www.waveformlighting.com/color-matching/what-is-d50-for-graphic-arts-printing">https://www.waveformlighting.com/color-matching/what-is-d50-for-graphic-arts-printing</a> .....	20
Figura 13 - CIE XYZ 1931 funzioni standard di corrispondenza dei colori dell'osservatore a 2°. Da Wikipedia....	21
Figura 14 - Sistema di coordinate opponenti in CIELAB .....	21
Figura 15 - Modello di colore CMY sottrattivo: la combinazione di C, M e Y fornisce un grigio scuro. Il nero è usato come quarto inchiostro per raggiungere profondità.....	24
Figura 16 - Esempio delle impostazioni GCR in Adobe Photoshop®.....	25
Figura 17 - Immagini grigie convertite in CMYK con le impostazioni GCR della Figura 16 e le quattro separazioni. Si possono vedere che M e Y hanno meno forza di C, per evitare l'effetto brunastro, e il canale K che contiene il contenuto CMY sostituito. ....	26
Figura 18 - TVI a 20, 40 e 80% .....	27
Figura 19 - TVI ideali dello standard FOGRA52.....	27
Figura 20 - TVI reali misurati in una macchina da stampa litografica offset .....	27
Figura 21 - Effetto dell'aumento anormale della TVI di ciano in un risultato di stampa. L'immagine di destra ha una dominante ciano.....	28
Figura 22 - Funzione di densità spettrale di un grigio composto da tre coloranti Agfa (25 p. 8) (Si noti che le lunghezze d'onda sono erroneamente etichettate come $\mu m$ invece di $nm$ ).....	29
Figura 23 - Correlazione di Schirmer delle curve di guadagno dei punti e delle densità logaritmiche nel bilanciamento dei grigi (25 p. 31) .....	30
Figura 24 - Diagramma di cromaticità CIE 1931 .....	31
Figura 25 - Esempio di asse grigio di una condizione di stampa con coordinate CIELAB della carta di [95, 1, -4] e L* più scuro di 25. Dalla ISO 12647-2:2013.....	33
Figura 26 - Esempio di set di immagini di bilanciamento del grigio perfettamente neutro (a sinistra), tonalità brunasta simulata (al centro), tonalità bluasta simulata (a destra).....	34
Figura 27 - Tipico grafico CMY di esempio - da G7 How-To.....	37

Figura 28 - Scala di calibrazione CMYK TVI di un modulo di file di stampa di prova – da una forma test di TAGA Italia .....	39
Figura 29 - Esempio di calibrazione TVI, mostrata nel dominio TV .....	39
Figura 30 - Esempio di calibrazione TVI, uguale alla Figura 29 ma nel dominio TVI .....	40
Figura 31 - Curve TVI delle condizioni di stampa standard ISO 12647-2:2013.....	41
Figura 32 - La Tabella 11 della norma ISO 12647-2:2013: tolleranze TVI e massima diffusione del tono medio per la calibrazione (colonna "OK print").....	41
Figura 33 - Asse grigio teorico (nero) e obiettivo di riproduzione previsto, considerando la quantizzazione a 8 bit utilizzata nelle immagini TIFF .....	46
Figura 34 – Diagramma di flusso di Grey_Balance_Extractor.m.....	47
Figura 35 – Forma test pagina 1: Calibrazione TVI.....	50
Figura 36 – Forma test pagina 2: pagina di calibrazione della riproduzione dei grigi .....	50
Figura 37 – Forma test pagine 3,4: Immagini Roman 16 Per la valutazione visiva dei grigi .....	51
Figura 38 – Forma test pagine 5,6,7: immagini Roman 16 per valutazione visiva generica.....	52
Figura 39 - TVI misurato e curva di correzione calcolata da una condizione lineare.....	54
Figura 40 - TVI misurato per verificare la condizione corretta, con correzione residua da applicare. L'ulteriore correzione non è stata applicata perché all'interno della variabilità del sistema.....	55
Figura 41 - Diagramma di flusso dello script MATLAB Grey_Findermlx .....	56
Figura 42 - I cinque diagrammi della riproduzione dei grigi .....	57
Figura 43 - Esempio di perfetta riproduzione dei grigi - la patch centrale ha il delta inferiore rispetto al valore CIELAB target: non è necessaria alcuna correzione M e Y .....	58
Figura 44 - La patch evidenziata ha il delta inferiore rispetto al CIELAB obiettivo: richiede la correzione M di -2,35 e la correzione Y di +1,57 (esempio simulato) .....	58
Figura 45 - Riproduzione dei grigi migliorati nel passo 2: correzione curve interpolate per M (sinistra) e Y (destra) .....	64
Figura 46 - Grafici delle LUT M e Y calibrati .....	65
Figura 47- Diagramma di flusso dello script MATLAB Grey_Evaluationmlx .....	66
Figura 48 - Asse grigio misurato dopo la calibrazione TVI (sezione 3.3.2) .....	66
Figura 49 - Asse del grigio misurato dopo l'ottimizzazione del bilanciamento dei grigi (sezione 3.3.3 PASSO 3) .....	66
Figura 50 - Immagini neutre (a sinistra) rispetto alla deviazione verdastra simulata (al centro) e all'effetto arcobaleno simulato di variazione della tonalità (a destra).....	67
Figura 51 - Valutazione visiva delle tonalità di grigio: stampa lineare (a sinistra), immagini calibrate TVI (al centro), immagini grigie ottimizzate (a destra).....	69
Figura 52 - Valutazione visiva dei colori pastello: stampa lineare (a sinistra), immagini calibrate TVI (al centro), immagini grigie ottimizzate (a destra).....	70

## Indice delle tabelle

Tabella 1 - X-Rite eXact™ principali specifiche.....	10
Tabella 2 - Konica Minolta FD-9 main specifications.....	11
Tabella 3 - Differenze tra i metodi di calibrazione G7 e TVI .....	42
Tabella 4 - Confronto del substrato con la caratterizzazione standard FOGRA51 .....	45
Tabella 5 - FOGRA51_GreyAxis.txt output del codice MATLAB Grey_Balance_Extractor.m .....	46
Tabella 6 - La condizione di stampa di prova.....	49
Tabella 7 - Bilanciamento del grigio originale e raffinato .....	58
Tabella 8 - LUT M e Y calibrate.....	65

Tabella 9 - Riproduzione e statistiche dei grigi calibrati .....	66
Tabella 10 - Evoluzione del GI durante le fasi di calibrazione .....	68

## Indice delle equazioni

Equazione 1 - La formula della differenza di colore CIELAB.....	22
Equazione 2 - Adattamento cromatico di von Kries.....	22
Equazione 3 - La funzione di separazione da XYZ a CMYK in gamma è non iniettiva non suriettiva .....	24
Equazione 4 - Fasi concettuali di calcolo GCR .....	25
Equazione 5 - Calcolo TVI da valori densitometrici .....	28
Equazione 6 - Calcolo TVI da valori colorimetrici XYZ .....	28
Equazione 7 - Calcolo delle coordinate di cromaticità xy da valori spettrali .....	31
Equazione 8 - Definizione grigia secondo ISO 12647-2:2013 4.2.8 .....	32
Equazione 9 - Formula di differenza di crominanza .....	33
Equazione 10 - Densità di stampa neutra di XYZ.....	36
Equazione 11 - Scala tonale “quasi neutra” G7 .....	37
Equazione 12 - Funzione concettuale per il calcolo di NPD .....	37
Equazione 13 – scala cromatica G7 CMY “quasi neutra” - da CGATS TR015 .....	38
Equazione 14 - Processo di calibrazione TVI generico .....	40
Equazione 15 – Equazione dei Grey Index - da (3) corretto con l'uso del valore assoluto delle differenze di crominanza, non presente nella formula originale $\Delta Cab$ * perché era sempre positivo nel caso d'uso originale. .	68

# 1. Introduzione

## 1.1. Descrizione del progetto

La stampa CMYK a quattro colori (ciano, magenta, giallo, nero) è l'architettura di stampa più semplice e comune utilizzata dalla maggior parte dei dispositivi a getto d'inchiostro digitali domestici, dalle stampanti digitali professionali di piccolo e grande formato, dai processi di stampa industriale come la litografia offset. I colori previsti sono riprodotti utilizzando una combinazione di inchiostri C, M, Y, K, dove il nero viene utilizzato per rafforzare le zone di oscurità, in opposizione ai colori chiari che utilizzano solo una combinazione di C, M e Y. Dal rilascio della seconda versione della norma ISO 12647-2 nel 2004, tutte le valutazioni, tarature e tolleranze sono espresse utilizzando lo spazio colore CIELAB ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ), utilizzando le formule colorimetriche di distanza CIEDE76 ( $\Delta E_{ab}$ ) e CIEDE2000 ( $\Delta E_{00}$ ). Queste formule di distanza colorimetrica consentono la descrizione e la comunicazione dell'accuratezza del colore, rimuovendo la soggettività utilizzata da secoli.

I colori acromatici grigi neutri sono un sottoinsieme di tutti i possibili colori che una stampante può ottenere. Data la natura della stampa CMYK sottrattiva, i colori grigi sono i più difficili da calibrare e tenere sotto controllo durante il processo di stampa. La ragione è in parte nella natura della visione umana, che è più sensibile nelle variazioni sui grigi neutri rispetto ad altri colori brillanti, e in parte nell'interazione chimica degli inchiostri C, M, Y che devono essere estremamente bilanciati per fornire un risultato decente.

La riproduzione dei grigi neutri nella stampa CMYK avviene bilanciando l'aspetto visivo dell'intera gamma dinamica degli inchiostri CMY cromatici (chiamati asse dei grigi), dal bianco al nero, e deve essere definita in tre diversi domini:

1. Definizione di grigio neutro, in cui i riferimenti colorimetrici CIELAB previsti sono definiti per l'intero asse dei grigi, in base al substrato e ad altri parametri.
2. Bilanciamento del grigio neutro, dove la quantità (di solito espressa in percentuale) di ogni canale di inchiostro C, M, Y nell'asse dei grigi è definita a priori durante il processo di calibrazione della stampante. Se il sistema è perfettamente calibrato, tali percentuali dovrebbero portare a grigi neutri,
3. Riproduzione dei grigi, in cui i grigi stampati risultanti vengono confrontati e valutati colorimetricamente rispetto agli obiettivi definiti durante la definizione del grigio neutro.

Il progetto è focalizzato sui processi di stampa CMYK industriale che utilizzano la riproduzione periodica a mezzitonni: include la stampa litografica offset, flessografica, serigrafica e rotocalco, nonché alcuni processi di stampa digitale.

L'attuale versione dello standard per la stampa litografica offset adottato dall'industria di tutto il mondo, ISO 12647-2:2013, suggerisce solo una descrizione della riproduzione dei grigi neutri, senza impostare requisiti o descrivere processi standard per raggiungerla. All'interno della ISO 12647-2 ci sono solo requisiti per i canali d'inchiostro C, M, Y, che vengono valutati nel dominio dell'aumento del valore del tono apparente (TVI): seguendo quei valori obiettivo, nella maggior parte dei casi l'utente può ottenere una riproduzione dei grigi decente, ma senza alcuna certezza sul risultato. (ISO 12647-2:2013 Graphic technology — Process control for the production of half-tone colour separations, proof and production prints — Part 2: Offset lithographic processes, 2013)

Negli Stati Uniti, un metodo chiamato G7® è ampiamente utilizzato dall'industria per avere una buona definizione di grigio neutro, un bilanciamento del grigio predefinito e per controllare la riproduzione del grigio. Il metodo potrebbe essere considerato un'estensione dello standard ISO 12647-2. (What Is G7, N/A)

Durante il processo di revisione della ISO 12647-2, iniziato due anni fa nel comitato tecnico ISO/TC130 (ISO/TC130 Graphic Technology, s.d.), seguendo le esigenze del settore, viene presa in considerazione una definizione più precisa di tutti e tre i passaggi con l'intenzione di essere compatibile anche con il metodo G7. Alla data di questo documento, gli esperti non hanno ancora concordato una sintesi dei metodi proposti.

Per ottenere una riproduzione del grigio neutro dalla definizione predefinita del grigio e dal bilanciamento del grigio, sono necessari i seguenti passaggi:

1. Ottenere la gamma cromatica standardizzata regolando i primari C, M, Y, K e i secondari C+M, M+Y, C+Y.
2. Regolare le curve di aumento del valore tonale standardizzate C, M, Y, K (TVI)
3. Ottimizzare la riproduzione dei grigi, mantenendo le tolleranze standard TVI del passaggio 2

I passaggi 1 e 2 sono ben noti e standardizzati dalla precedente edizione della ISO 12647-2, datata 2004. Tuttavia, standardizzare il passaggio 3 è una sfida anche oggi.

Il progetto si concentra sulla fase 3, la messa a punto della riproduzione grigia, anche se l'implementazione inizia dalla fase 2 per motivi pratici.

Dopo aver definito l'asse dei grigi neutri e aver utilizzato il bilanciamento dei grigi da una caratterizzazione ampiamente utilizzata in Europa, FOGRA51 (Characterisation data for relevant printing conditions, s.d.), verrà messo a punto un sistema di stampa e la riproduzione del grigio sarà valutata sia utilizzando i criteri della ISO 12647-2 che una nuova formula chiamata Grey Neutrality Index (GI), pubblicata nella 27th Colour and Imaging Conference del 2019 dall'autore. (Biswas, Beltrami, & Saez, 2019)

## 1.2. Giustificazione

Il bilanciamento dei grigi è una delle grandi sfide di ogni sistema di stampa CMYK e di ogni produttore di stampanti o industria di stampa. Quando la calibrazione viene effettuata seguendo un sistema o uno standard già bilanciato, come le condizioni di riferimento GRACoL utilizzate negli Stati Uniti e realizzate

in condizioni G7, il processo è ben definito e conosciuto dal mercato e strumenti e processi sono disponibili da molti fornitori. Al contrario, in Europa, le caratterizzazioni standard fornite da FOGRA (Characterisation data for relevant printing conditions, s.d.) lasciano gli stampatori liberi di identificare il loro flusso di lavoro, e la maggior parte dei passaggi non sono ancora standardizzati: questo è l'approccio dell'attuale standard ISO 12647-2 (ISO 12647-2:2013 Graphic technology — Process control for the production of half-tone colour separations, proof and production prints — Part 2: Offset lithographic processes, 2013). Applicando alcuni metodi utilizzati negli Stati Uniti, adattati alle condizioni di partenza europee FOGRA, il progetto dimostrerà che è possibile ottenere una buona condizione di riproduzione grigia neutra in modo semplice e automatizzato.

### **1.3. Motivazione**

Le tecnologie grafiche sono la mia passione e il mio lavoro degli ultimi 18 anni, quando sono entrato in questo settore dopo una carriera iniziale trascorsa in software colorimetrici per la pittura. La sfida della riproduzione dei grigi in stampa è iniziata nel XV secolo anche con l'opera realizzata da Ugo da Carpi (1470-1532) (Ugo da Carpi, 2021), mio concittadino di Carpi (Modena), ed è stata sviluppata in età moderna dal fotografo Ansel Adams (1902-1984) (Ansel Adams, 2021) che ha ispirato il metodo G7 precedentemente citato. Sono un grande fan di entrambi gli artisti ed è un piacere aggiungere il mio contributo a questo argomento.

### **1.4. Scopo**

Lo scopo del progetto di Laurea è quello di identificare e applicare lo stato dell'arte del bilanciamento dei grigi neutri e della calibrazione della riproduzione in un processo di stampa CMYK. Viene applicato un metodo di calibrazione in 3 fasi per essere compatibile con lo standard ISO 12647-2 (ISO 12647-2:2013 Graphic technology — Process control for the production of half-tone colour separations, proof and production prints — Part 2: Offset lithographic processes, 2013) e per ottenere una condizione di bilanciamento dei grigi neutri, concentrandosi sul caso quando si parte da una caratterizzazione non ottimizzata.

### **1.5. Obiettivi**

- Descrivere e analizzare tutti i passaggi che consentono una calibrazione dei grigi neutri in un processo di stampa CMYK.
- Identificare un processo che possa essere il più automatizzato possibile, eseguito da utenti non qualificati.
- Identificare un metodo per comunicare il risultato con una metrica espressa con un singolo numero.

## 1.6. Dispositivi

Per eseguire l'indagine, sono stati utilizzati tre dispositivi professionali: una stampante industriale, uno spettrodensitometro e uno spettrofotometro automatico.

### 1.6.1. Tecnologia di stampa

Una macchina da stampa digitale CMYK HP Indigo è stata utilizzata per stampare i campioni, grazie alla cortesia dell'azienda corGae. HP Indigo è una stampante digitale con processo elettrofotografico liquido che ha un metodo di trasferimento similare a quello delle macchine da stampa litografiche offset. Per questo motivo, il processo di calibrazione è quasi identico a quello di una macchina da stampa offset ed è anche più veloce ed economico perché completamente guidato dal digitale. La HP Indigo 12000 HD utilizzata, mostrata nella Figura Figura 1, è in grado di stampare 3'450 fogli 75x53 cm all'ora a risoluzioni nell'intervallo [175-290] linee per pollice (LPI).



Figura 1 – La HP Indigo 12000 HD di corGae sas, Italia

### 1.6.2. Strumenti di misura

Le misurazioni manuali sui fogli stampati durante il processo di calibrazione TVI sono state effettuate con uno spettrodensitometro X-Rite eXact (eXact™ spectrophotometer, s.d.)



Figura 2 - X-Rite eXact™ spettrofotometro portatile

Tabella 1 - X-Rite eXact™ principali specifiche

Tipo	Spettrofotometro 45°/0°
Dati spettrali	400-700nm a intervalli di 10nm
Apertura	2 o 4 mm
Accordo interstrumentale	Media 0,25 Δ E <sub>ab</sub> , Max 0,45 Δ E <sub>ab</sub> su 12 piastrelle BCRA
Ripetibilità a breve termine	Deviazione standard 0,05 Δ E <sub>ab</sub> su piastrella bianca BCRA
Condizioni di misura	ISO 13655 M0, M1, M2, M3

Le misurazioni automatiche sui grafici saranno effettuate con uno spettrofotometro Konica Minolta FD-9 (FD-9 catalog)



Figura 3 - Spettrofotometro Konica Minolta FD-9

Tabella 2 - Konica Minolta FD-9 main specifications

Tipo	Spettrofotometro a scansione 45°/0°
Dati spettrali	380-730nm a intervalli di 10nm
Apertura	3 mm
Accordo interstrumentale	Max 0,3 Δ E <sub>00</sub> su 12 piastrelle BCRA
Ripetibilità a breve termine	Deviazione standard 0,05 Δ E <sub>00</sub> su piastrella bianca BCRA
Condizioni di misura	ISO 13655 M0, M1, M2

## 1.7. Metodologia

La calibrazione di una stampante è un processo sequenziale che non si adatta bene alle metodologie Agile come Scrum. Agile è molto efficiente quando i requisiti originali non sono completamente definiti e quando è possibile suddividere il valore incrementale del prodotto in sotto-prodotti indipendenti.

In questo caso, abbiamo un processo ben definito e azioni sequenziali per ottenere il risultato finale della calibrazione. La migliore metodologia per gestire questo progetto è la waterfall, con spunti che provengono dalle pratiche di Critical Chain Project Management (CCPM).

Per ottenere il risultato, è necessario mantenere l'attenzione su tre temi CCPM specifici:

1. Identificare e risolvere dipendenze esplicite e implicite

## Ottimizzazione della riproduzione dei grigi nei processi di stampa CMYK

2. Accettare il piano identificato "così com'è" e dedicare del tempo a identificare le incertezze e i possibili rischi di mancato avanzamento
3. Utilizzare i buffer nella catena critica per consentire un certo margine nelle operazioni

Poiché si tratta di una gestione del progetto waterfall, la creazione di una Work Breakdown Structure (WBS) è cruciale, così come altri strumenti come GANTT e Breakdown Charts.

## 1.8. Pianificazione

La pianificazione delle attività è stata effettuata con lo strumento software Microsoft Project, applicando i concetti descritti nella sezione 1.7 di cui sopra. Nella Work Breakdown Structure (WBS) della Figura **Error! Reference source not found.**Figura 4 è possibile vedere la sequenza delle principali attività. Un buffer prudente di circa il 30% del tempo di lavoro iniziale stimato è stato aggiunto alla fine del progetto ed è stato rivalutato periodicamente. È stato fondamentale ottenere la conferma dei tre slot necessari per stampare i vari test, come mostrato nella Figura **Error! Reference source not found.**Figura 5. Sono state identificate tre risorse: il lavoro svolto a casa, il tempo di stampa e il tempo di laboratorio del colore. I calendari di lavoro sono stati impostati in base all'orario di lavoro e ai giorni di disponibilità/indisponibilità. Il report di progetto della Figura **Error! Reference source not found.**Figura 6 generato automaticamente da Microsoft Project, è stato utilizzato settimanalmente per tenere traccia dello stato inizialmente stimato in 205 ore totali.

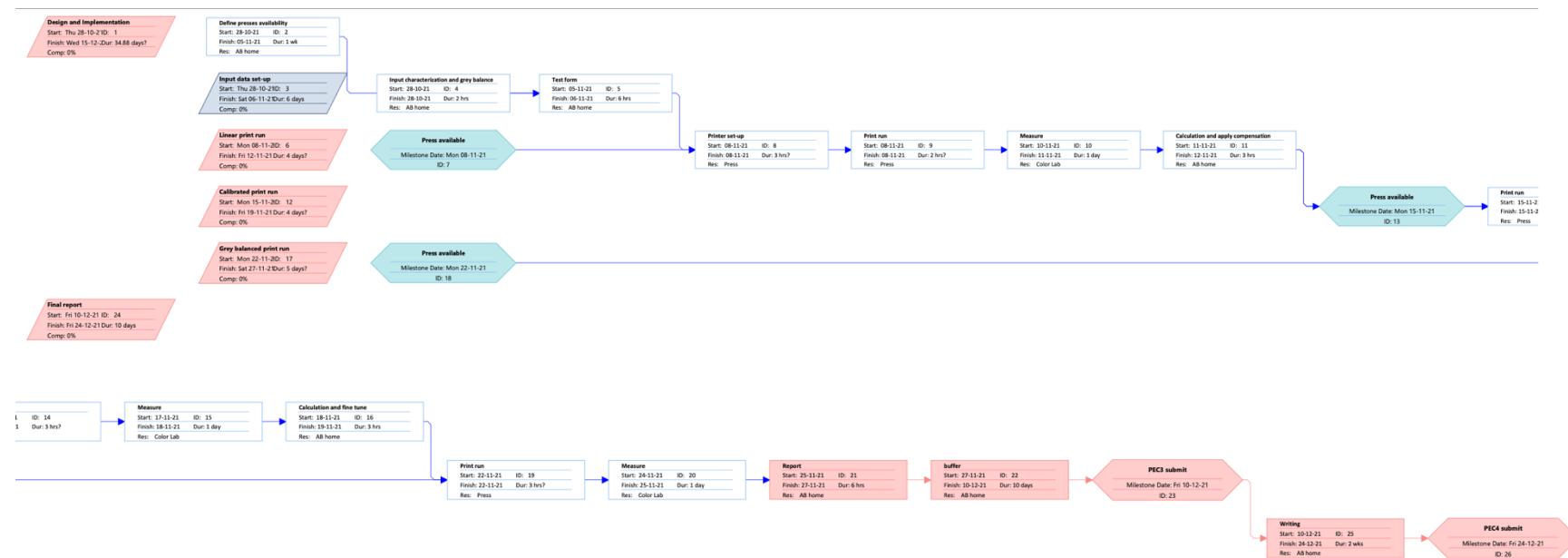


Figura 4 - Work Breakdown Structure

## Ottimizzazione della riproduzione dei grigi nei processi di stampa CMYK

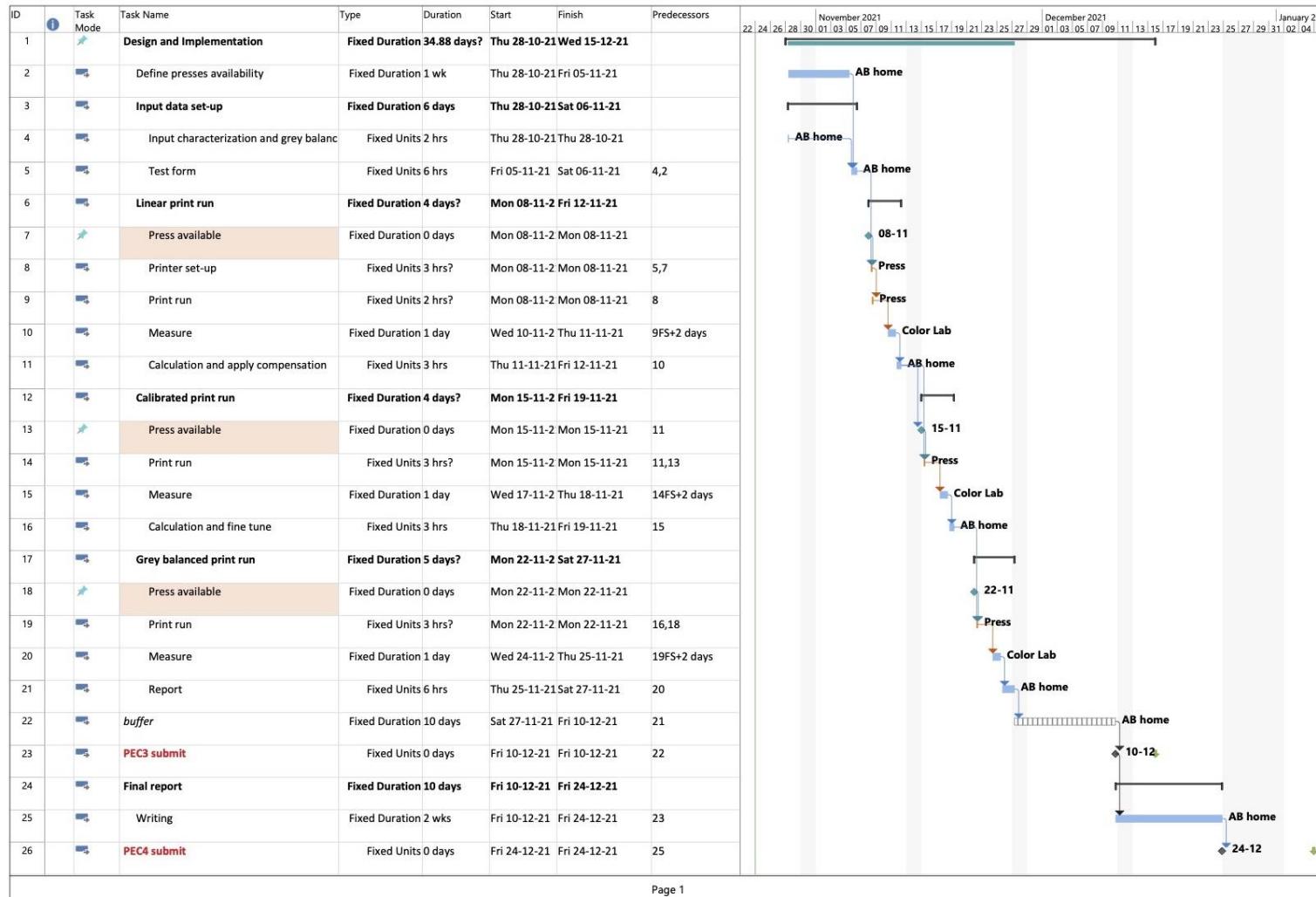


Figura 5 – Diagramma di GANTT

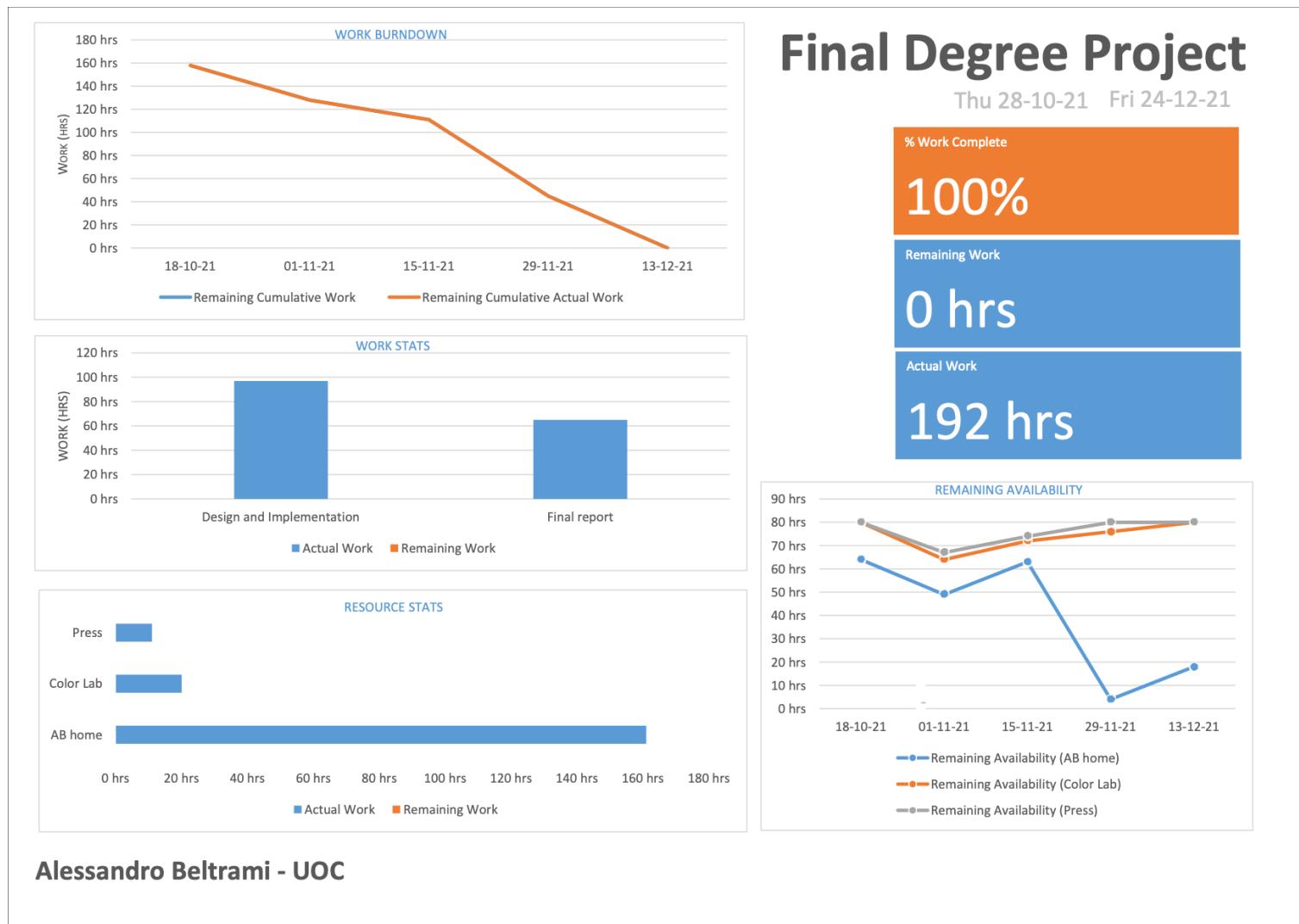


Figura 6 - Relazione di progetto alla fine dei lavori

## 1.9. Struttura del resto del documento

Il capitolo 2 introduce lo stato dell'arte della riproduzione dei grigi nella stampa da una prospettiva storica, matematica e tecnologica nella grafica industriale.<sup>2</sup>

Il capitolo 3 contiene la progettazione e l'implementazione del test, con valutazioni analitiche e soggettive dei risultati.**Error! Reference source not found.**

Il capitolo 4 è incentrato sulla revisione dei risultati, sulla retrospettiva della metodologia utilizzata e su possibili lavori futuri.**Error! Reference source not found.**

## 2. Stato dell'arte

### 2.1. Origine della stampa dei grigi

La stampa è una tecnica di riproduzione che è stata inventata intorno al 220 d.C. in Cina, utilizzando tessuti e carta, e appare sottoforma di xilografia nel V secolo sia in Giappone che in Europa. Fino ai primi anni del VI secolo la maggior parte dei libri o delle stampe artistiche che contengono immagini, diverse dal testo, erano realizzati in Europa utilizzando solo i contorni degli elementi, senza sfumature di grigi o colori, come mostrato nell'esempio della Figura Figura 7 (Barrett, 2008).



Figura 7 - Pagina da Biblia  
Pauperum, secolo XV

Fin dall'inizio, la stampa xilografica è stata in competizione con la pittura a pennello perché può consentire di replicare lo stesso soggetto molte volte con pochi sforzi e costi. La pittura a pennello, invece, permette un'incredibile qualità e realismo sulle immagini a discapito del tempo e dei costi necessari per creare un'unica copia. Oggi diremmo che la pittura a pennello non è scalabile.

Nei primi anni del secolo XVI, due diverse scuole iniziano ad aggiungere sfumature alla stampa xilografica. La scuola tedesca rappresentata da Lucas Cranach e Hans Burgkmair, seguita alcuni anni dopo dall'italiano Ugo da Carpi, inizia a studiare l'uso delle tonalità chiamate "chiaroscuro". Anche se l'attribuzione ufficiale delle tecniche è a favore di Hans Burgkmair con l'opera rappresentata nella Figura Figura 8 il famoso pittore Giorgio Vasari (1511 - 1574) diede la paternità della tecnica a Ugo da Carpi perché separò il contorno nero profondo e le tonalità grigie a seconda della profondità delle ombre, un modo simile a quello che l'industria tipografica utilizzerà nei secoli successivi (un esempio può essere visto in Figura Figura 17). I primi tentativi datati 1510-1511 sono andati perduti, e la riproduzione più antica di questa tecnica da Ugo da Carpi è rappresentata nella Figura Figura 9 (Petrucci, 1932) realizzata qualche anno dopo delle opere di Burgkmair.



Figura 8 - Burgkmair H., Lovers Surprised by Death, 1510



Figura 9 - Ugo da Carpi – Sibilla che legge – intaglio in legno originale 1510-15 ca., foto di una riproduzione datata 1520-27 ca.

## 2.2. La fotografia e il Sistema delle Zone

Il ponte tra le opere antiche e le tecniche moderne è il Sistema delle Zone (Zone System) formulato dal fotografo Ansel Adams in collaborazione con Fred Archer nel 1939-40. Il sistema è stato sviluppato principalmente per aiutare a trovare l'esposizione corretta per le pellicole fotografiche, ma qui siamo più interessati all'effetto di contrasto di stampa di tali esposizioni. Il lavoro è legato alla riproduzione dei grigi per l'introduzione di due concetti: la separazione tra le "ombre" e le "luci", seguita dalle definizioni di una scala a dieci zone che permettono di semplificare il controllo del contrasto dei livelli di grigio nelle stampe fotografiche. Il principale contributo alla riproduzione grigia del Sistema delle Zone è stato quello di aver individuato la necessità di un metodo scientifico per tenere sotto controllo i grigi. (Johnson, 2007)

ZONES	0	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
1. UNITS OF LIGHT	½	1	2	4	8	16	32	64	128	256
2. EXPOSURE VALUES (EV)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
3. RELATIVE f/STOPS	f/64	f/45	f/32	f/22	f/16	f/11	f/8	f/5.6	f/4	f/2.8
4. RELATIVE SHUTTER SPEEDS	1/250	1/125	1/60	1/30	1/15	1/8	1/4	1/2	1 sec.	2 sec.
5. RELATIVE ASA	6400	3200	1600	800	400	200	100	50	25	12

Figura 10 - L'equivalenza di zone, letture di esposizione, f/stop, velocità dell'otturatore e numeri ASA (Johnson, 2007, p. 31).



Figura 11 - Ansel Adams, The Tetons and the Snake River, 1942, esempio di una foto perfettamente bilanciata che copre tutte le zone del Sistema a Zone (Ansel Adams, 2021)

È ancora oggi una sfida riprodurre con un processo di stampa una foto come quella mostrata in Figura Figura 11 sia per la necessità di preservare il contrasto che di rendere un grigio neutro.

### 2.3. Fisica e colorimetria dei colori grigi

Per capire e descrivere i grigi, dobbiamo capire cos'è un colore o, come dice Fairchild "perché è colore" (Fairchild, 2005, p. 57).

#### 2.3.1. Colorimetria

Il colore è un fenomeno psicologico che dipende strettamente dall'uomo: senza un osservatore umano non ci potrebbe essere colore. Per questo motivo, la colorimetria, la scienza della misurazione e della descrizione del colore, tiene conto sia delle proprietà fisiche dell'ambiente che delle proprietà psicologiche del sistema visivo umano, composto principalmente da occhio, sistema nervoso e cervello. (Reinhard, Khan, O., & M., 2008, p. 363)

Il colore può essere descritto solo sotto la definizione di sorgenti luminose e illuminanti, una geometria che descrive la relazione tra l'illuminante e l'oggetto visto e la risposta visiva umana (o una sua semplificazione). (Fairchild, 2005, p. 58)

Le distribuzioni spettrali degli illuminanti sono standardizzate dalla *Commission Internationale de l'Eclairage* (CIE). Per le arti grafiche, l'illuminante più rilevante è il D50, che rappresenta la luce naturale calda con una temperatura correlata di circa 5003K. Va notato che tutti gli altri settori industriali come inchiostri, materie plastiche, vernici, ecc., utilizzano l'illuminante D65 che è maggiormente

## Ottimizzazione della riproduzione dei grigi nei processi di stampa CMYK

standardizzato (circa 6504K). D50 è stato scelto a metà del secolo scorso dalla fotografia e dalle arti grafiche per la visione di pellicole trasparenti positive a causa della calda tonalità di colore giallo / rosso delle carte di quell'epoca. D50 ha permesso un aspetto grigio neutro più equilibrato rispetto a D65 in quelle condizioni; anche se oggi i film sono usati raramente, e il colore medio delle carte è passato a un blu freddo, D50 è mantenuto negli standard delle arti grafiche per ragioni di coerenza con il passato.

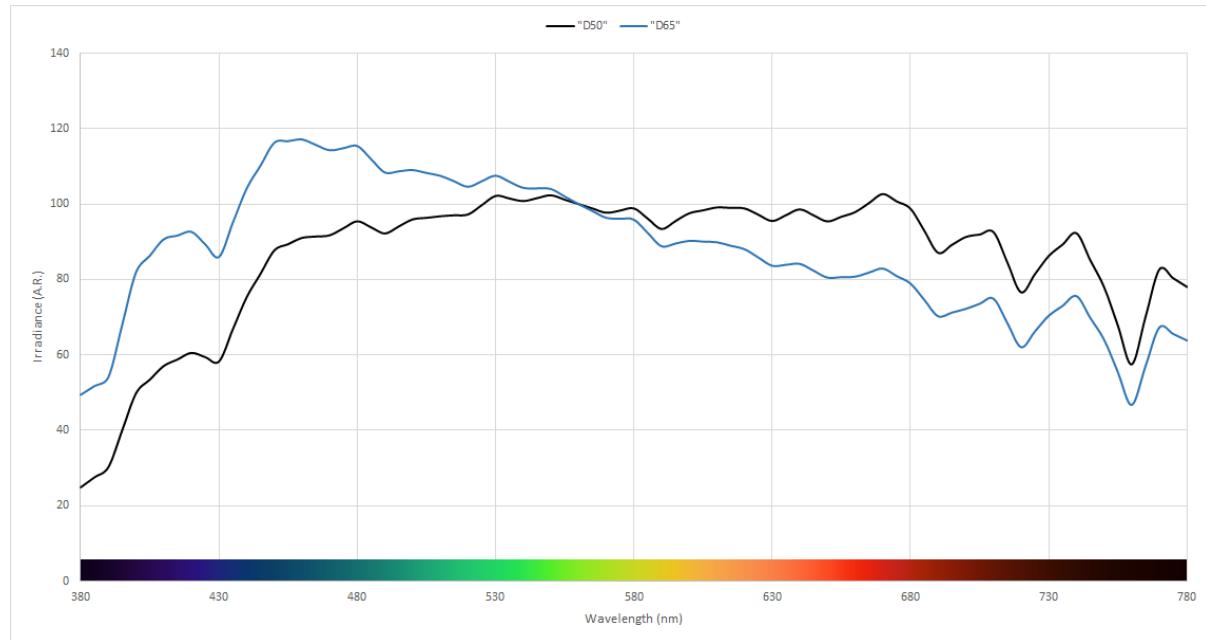


Figura 12 - Confronto tra le distribuzioni spettrali D50 e D65  
da <https://www.waveformlighting.com/color-matching/what-is-d50-for-graphic-arts-printing>

Nel 1931 la CIE rilasciò le funzioni di corrispondenza dell'osservatore standard 2° che, partendo dagli esperimenti di Wright e Guild, permettono di calcolare i colori percepiti in una vista a campo stretto integrata in uno spazio colore tristimolo chiamato XYZ. Le funzioni sono mostrate nella Figura Figura 13. Anche se nel 1964 è stato definito un osservatore standard a 10° più utile, oggi utilizzato nella maggior parte dei settori, le arti grafiche continuano ad utilizzare la condizione D50/2° indipendentemente dalla reale dimensione del campo di visualizzazione richiesta dalla specifica applicazione. Ad esempio, 2° osservatore rappresenta bene una cartolina stampata vista a 30 cm dagli occhi, ma 10° sarebbe più adatto guardando un cartellone pubblicitario. Per evitare complessità, D50/2° è l'unica condizione standardizzata di tutti i calcoli cromatici delle arti grafiche.

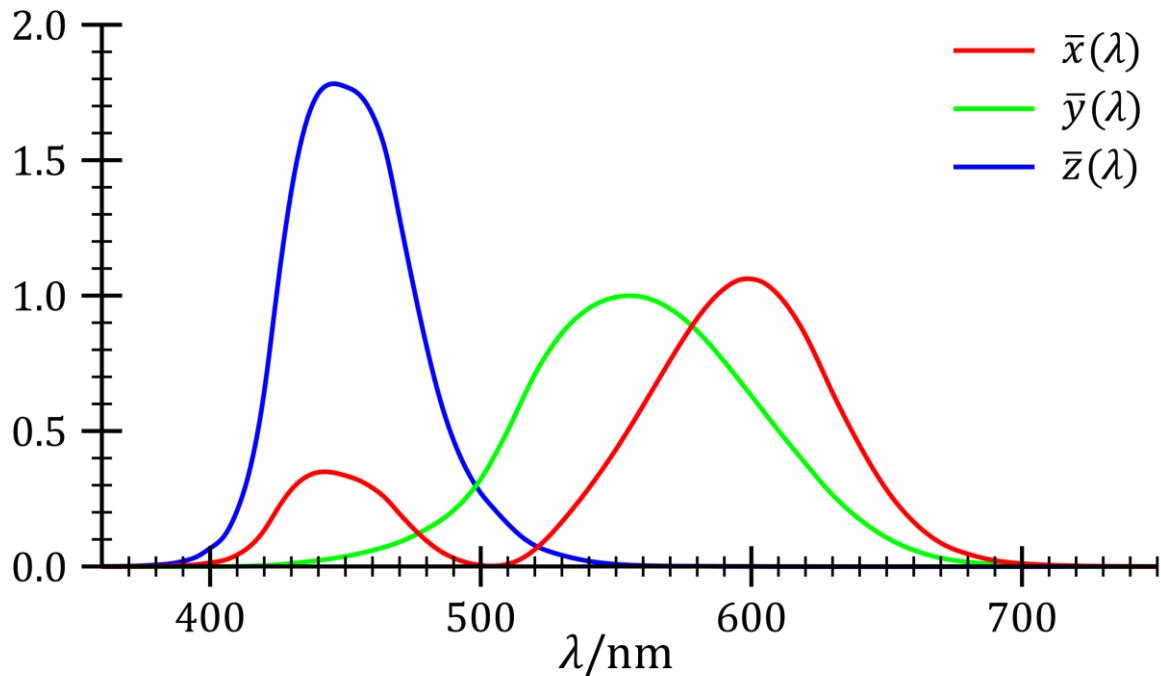


Figura 13 - CIE XYZ 1931 funzioni standard di corrispondenza dei colori dell'osservatore a  $2^\circ$ . Da Wikipedia.

In un caso riflettente, i valori XYZ sono calcolati integrando la riflettanza spettrale dell'oggetto moltiplicata per la potenza relativa dell'illuminante e le funzioni di corrispondenza, come mostrato nell'equazione Equazione 7.

Le coordinate XYZ descrivono completamente ogni colore visto dall'osservatore standard, ma non contengono informazioni sull'aspetto visivo. In altre parole, lo spazio colore XYZ non è percettivamente uniforme e non è possibile correlare le distanze euclidi con le differenze di colore. Per questi motivi, dopo molti tentativi di sviluppare spazi cromatici uniformi percettivi, nel 1976 il modello CIELAB (noto anche come  $L^*a^*b^*$ , o semplicemente Lab) è emerso come una convergenza delle diverse proposte ed è ancora oggi ampiamente utilizzato in tutta l'industria del colore.

CIELAB è uno spazio colore tridimensionale in cui la chiarezza è espressa dalla coordinata  $L^*$  e la cromaticità dalle coordinate  $a^*$  e  $b^*$  in un sistema di tipo opponente rosso/verde verso giallo/blu come mostrato in Figura Figura 14

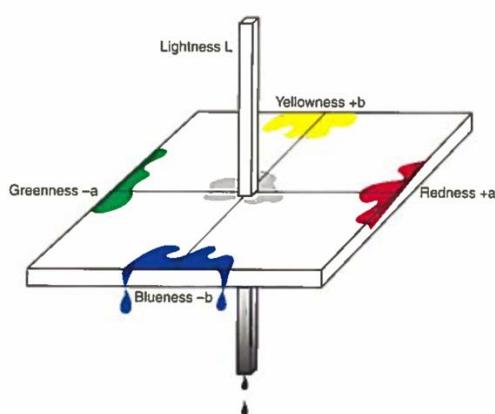


Figura 14 - Sistema di coordinate opponenti in CIELAB

Per calcolare le differenze di colore, due formule vengono utilizzate nelle industrie di stampa: la distanza geometrica euclidea mostrata nell'equazione Equazione 1 e la formula più complessa CIEDE2000 ( $\Delta E_{00}$ ) sviluppata da Luo, Cui e Rigg e adottata da CIE nel 2001 e successivamente da ISO in diversi standard. (Luo & Cui, 2001)

Equazione 1 - La formula della differenza di colore CIELAB

$$\Delta E_{ab} = \sqrt{(L_1^* - L_2^*)^2 + (a_1^* - a_2^*)^2 + (b_1^* - b_2^*)^2}$$

L'uso della formula di differenza di colore CIEDE2000 è attualmente raccomandato in tutti i casi, tranne quando la distanza euclidea ha una migliore correlazione con la metrica fisica sottesa, come esempio quando è necessario correlarla con lo spessore dell'inchiostro.

Utilizzando gli spazi colore XYZ o CIELAB è possibile descrivere tutti i colori percepiti da un osservatore standard (2° nel nostro caso) sotto un certo illuminante (D50 nel nostro caso). I colori grigi sono contenuti in questi spazi di colore.

### 2.3.2. Adattamento cromatico

L'adattamento cromatico del nostro sistema di visione è la capacità di preservare l'aspetto dei colori dell'oggetto in diverse condizioni di visione che circondano l'oggetto o pre-esposte. È un meccanismo chiave per la comparsa di colori grigi ed è una complessa interazione di diversi fenomeni fisici che si sovrappongono. Qui siamo più interessati alla descrizione qualitativa dell'adattamento cromatico, nel contesto della stampa, che a una modellazione quantitativa.

L'adattamento cromatico può essere osservato guardando un pezzo di carta bianco, ad esempio, in diverse condizioni di visione: anche se le luci diurne (come la serie CIE D) contengono più energia a lunghezza d'onda corta rispetto alle lampadine fluorescenti o al tungsteno, il colore percepito della carta mantiene il suo aspetto bianco. (Fairchild, 2005, p. 157)

Nel 1904 Johannes von Kries ha formulato l'ipotesi che l'adattamento effettuato da una specifica area retinica modifichi le sensibilità complessive dell'intera gamma tristimolo attraverso una trasformazione lineare. Questo assunto è usato ancora oggi per applicare matematicamente l'adattamento cromatico in molti spazi cromatici, anche se la versione di Bradford è oggi la più utilizzata. (Wyszecki G., 1982, p. 431)

Equazione 2 - Adattamento cromatico di von Kries

$$\begin{bmatrix} X_D \\ Y_D \\ Z_D \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} X_S \\ Y_S \\ Z_S \end{bmatrix}, \quad \text{dove } D = \text{colore di destinazione}, \quad S = \text{colore sorgente}$$

La matrice M è una concatenazione di matrici che esegue tre trasformazioni: (Lindbloom, 2017)

1. Trasformare da XYZ in un *dominio di risposta dei coni* ( $\rho\rho$ ,  $\gamma\gamma$ ,  $\beta\beta$ ).
2. Ridimensionare le componenti vettoriali in base a fattori dipendenti dai bianchi di riferimento di origine e di destinazione.
3. Trasformare da ( $\rho\rho$ ,  $\gamma\gamma$ ,  $\beta\beta$ ) a XYZ usando la trasformata inversa del passo 1.

Nel contesto della riproduzione dei grigi, è interessante notare che la matrice M dipende solo dal riferimento bianco sorgente e dal bianco di destinazione.

Da lì, possiamo definire due diverse condizioni di visualizzazione: una quando si considera come riferimento l'illuminazione circostante, la seconda quando si considera come riferimento il substrato illuminato dalla luce circostante. Non è possibile definire a priori in quale contesto un utente farà la valutazione della stampa: nella maggior parte dei casi il nostro sistema di visione cambierà continuamente l'adattamento tra i due punti di bianco, soprattutto quando il substrato bianco non è così neutro sotto l'illuminazione circostante.

## 2.4. Cenni sulla separazione dei colori del processo di stampa CMYK

Come abbiamo visto nella sezione 2.1, la stampa è una tecnica molto antica di riproduzione delle immagini, e da lì molti processi sono stati inventati in più di 2000 anni. Ci concentriamo ora sul processo di stampa più utilizzato oggi per spot pubblicitari, giornali, grande formato e belle arti: la stampa a inchiostri CMYK a quattro colori. Si prega di notare che alcune applicazioni popolari, ad esempio la maggior parte degli imballaggi alimentari, utilizzano diverse combinazioni di inchiostri. C'è anche da notare che ci sono molti processi tecnologici che utilizzano la combinazione CMYK, come la litografia offset, la flessografia, la serigrafia, il rotocalco e molte tecnologie digitali. In questo lavoro cerchiamo il più possibile di essere indipendenti da quelle tecnologie e dalle loro implicazioni.2.1

Il fondamento del processo di stampa CMYK è la separazione dei colori: la divisione di un'immagine colorata in quattro componenti separati corrispondenti ai colori primari ciano (C), magenta (M), giallo (Y), con il rinforzo di un inchiostro nero (K). L'uso di K è necessario in quasi tutti i processi di stampa per ottenere più stabilità nei colori più scuri e una migliore definizione di elementi come il testo o le arti delle linee.

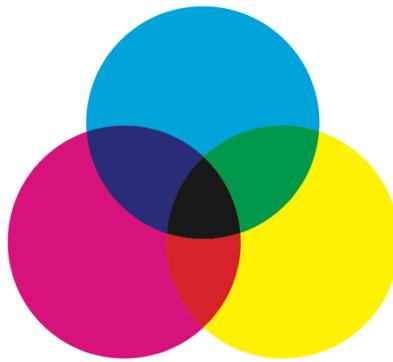


Figura 15 - Modello di colore CMY sottrattivo: la combinazione di C, M e Y fornisce un grigio scuro. Il nero è usato come quarto inchiostro per raggiungere profondità.

Poiché un colore specifico in un'immagine può essere definito come un tristimolo XYZ colorimetrico (di solito RGB, raramente CIELAB, ma entrambi possono essere considerati come trasformazioni lineari di XYZ), teoricamente esiste una sola combinazione CMY che corrisponde al colore originale: la funzione può essere considerata una biiezione  $f: XYZ \rightarrow CMY$ , in una condizione teorica che C, M e Y sono primari puri e in grado di coprire tutto lo spazio colore di XYZ. Nei processi di stampa reali queste condizioni non si verificano mai. e la separazione non è più una funzione. Ciò implica che alcuni colori nel dominio XYZ non possono essere rappresentati nel codominio CMY, ma tutti i colori nell'immagine CMY possono essere rappresentati nel dominio originale XYZ con una sola possibile correlazione tra XYZ e CMY. I colori XYZ che non possono essere rappresentati sono chiamati colori fuori gamma e quelli che possono essere rappresentati sono chiamati colori in gamma.

Considerando solo i colori XYZ in gamma, la separazione è una biiezione  $f: XYZ' \rightarrow CMY$  e vedremo in seguito che questa caratteristica viene utilizzata nel processo di calibrazione del grigio.

Data l'introduzione di K, il codominio passa da una 3-dimensione a una 4-dimensione, e la separazione diventa una funzione generale non iniettiva non suriettiva:

Equazione 3 - La funzione di separazione da XYZ a CMYK in gamma è non iniettiva non suriettiva

$$\begin{aligned} \forall cmyk \in CMYK, & \text{può } \exists xyz' \in XYZ' \text{ così che } cmyk = f(xyz'), \text{ e} \\ \forall xyz' \in XYZ', & \exists \text{ più di un } cmyk \in CMYK \text{ così che } xyz' = f'(cmyk) \end{aligned}$$

C'è un'importante implicazione in tutto ciò: molte combinazioni CMYK possono rendere lo stesso colore XYZ e scegliere quale di esse utilizzare durante il processo di separazione richiede una strategia definita. In altri termini, questa strategia definisce dove si trova l'immagine della funzione di separazione nel codominio CMYK.

Ci sono molte strategie possibili che possono essere applicate, la più utilizzata oggi si chiama Grey Component Replacement (GCR) introdotta da John Yules nel 1940 (Yules, 1940). In una stampa CMY, i due inchiostri predominanti determinano la tonalità e il terzo inchiostro minore determina la sua crominanza con un effetto negativo. In effetti, il terzo inchiostro aggiunge grigore al risultato (Ileto, 2008). La strategia GCR è quella di rimuovere il terzo contributo minore di inchiostro, in tutto o in parte,

rimuovendo così la corrispondente quantità dei due inchiostri dominanti e sostituendola con una quantità corrispondente di inchiostro K. Sostituendo una certa quantità di CMY con una certa quantità di K permette di ottenere un processo di stampa più stabile, soprattutto nell'asse grigio, e si raggiunge un nero scuro puro.

Sebbene all'epoca delle pellicole analogiche le formule GCR fossero abbastanza semplici, oggi con l'evento delle immagini digitali e delle separazioni effettuate dai software, ogni fornitore ha la sua formula personalizzata. L'approccio GCR può essere concettualizzato in un algoritmo in tre fasi, prima K viene calcolato dal tristimolo in-gamut e da un insieme di parametri, successivamente la terna CMY viene calcolata considerando K e di nuovo il tristimolo originale. Alla fine CMY e K vengono combinati nei valori CMYK finali.

Equazione 4 - Fasi concettuali di calcolo GCR

$$k = f_{GCR}(xyz', [S]), \quad cmy = f(k, xyz'), \quad cmyk = cmy + k,$$

dove  $[S]$  è un insieme di parametri come limite di inchiostro, spessore del nero, curva del nero, ...

Soltamente, la quantità di K in un colore grigio è superiore al K calcolato per un colore cromatico con la stessa chiarezza, in questo senso la funzione GCR si adatta all'area di colore del tristimolo di ingresso a seconda dei diversi parametri.

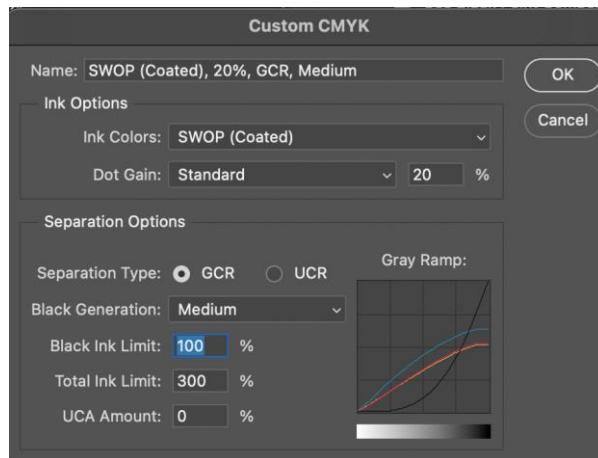


Figura 16 - Esempio delle impostazioni GCR in Adobe Photoshop®

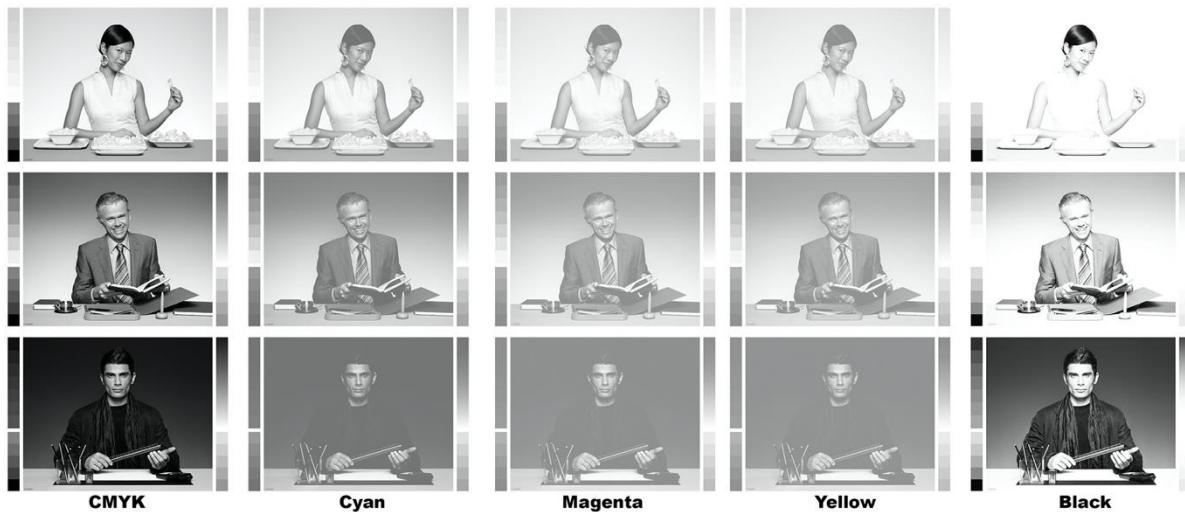


Figura 17 - Immagini grigie convertite in CMYK con le impostazioni GCR della Figura Figura 16e le quattro separazioni. Si possono vedere che M e Y hanno meno forza di C, per evitare l'effetto brunastro, e il canale K che contiene il contenuto CMY sostituito.

La riproduzione di immagini grigie in un processo di stampa CMYK può essere eseguita teoricamente in tre modi: utilizzando solo inchiostro K, utilizzando solo inchiostri CMY o utilizzando una combinazione CMYK. Anche se sembra controllato, l'uso del solo inchiostro K di solito non fornisce una buona qualità dell'immagine per le immagini grigie: il risultato è sgrano, anche se perfettamente neutro (assumendo un inchiostro nero perfettamente acromatico). D'altra parte, le selezioni CMY forniscono immagini fluide e una buona qualità dell'immagine, ma sono piuttosto instabili durante le tirature di stampa. Quindi, l'approccio comune è quello di utilizzare una separazione CMYK completa adottando una tecnica GCR come mostrato sopra, bilanciando la morbidezza dell'immagine, la riproduzione dei dettagli, al costo di accettare alcuni possibili cambiamenti di colore durante la produzione.

## 2.5. Il valore dell'incremento tonale

Nella sezione 2.4 di cui sopra, la stampa CMYK è stata descritta indipendentemente dalla tecnologia utilizzata. Tuttavia, c'è un effetto importante che è stato rilevato e codificato sulle presse litografiche offset e che è causato principalmente dalla pressione utilizzata durante questo processo: il *dot gain*. Con l'avvento della stampa digitale, dove normalmente non c'è nessuna pressione, il concetto è stato mantenuto ed è applicabile anche in quei contesti.2.4 più sopra

L'aumento del valore tonale (TVI), noto anche come *dot gain*, è la differenza tra il valore tonale (TV) sulle pellicole delle separazioni o sul file digitale e il TV in stampa. Viene specificato in percentuale ed è una caratteristica di tutti i processi di stampa. La curva TVI dipende dal processo stesso, dagli inchiostri, dal substrato e da altri parametri che possono essere riassunti in una cosiddetta "condizione di stampa".

## Ottimizzazione della riproduzione dei grigi nei processi di stampa CMYK

Data	20 %	40 %	80 %	100 %
Print				
	30 %	55 %	90 %	100 %
TVI (%)	10 %	15 %	10 %	0 %

Figura 18 - TVI a 20, 40 e 80%

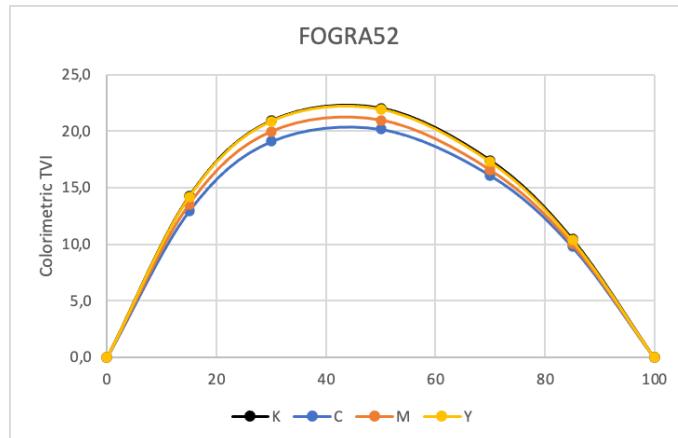


Figura 19 - TVI ideali dello standard FOGRA52

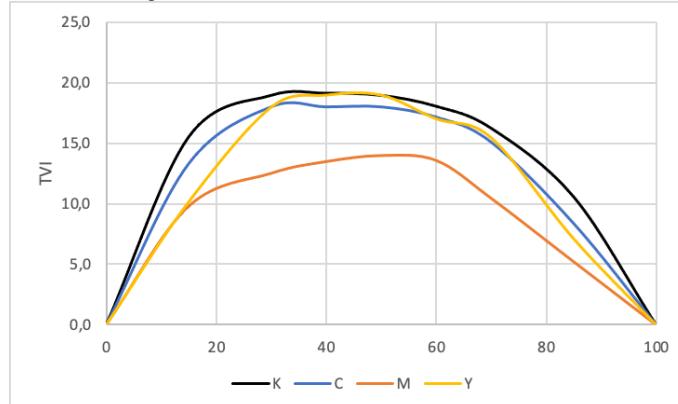


Figura 20 - TVI reali misurati in una macchina da stampa litografica offset

La curva TVI è un attore chiave del bilanciamento dei grigi, perché è uno dei parametri più importanti che devono essere standardizzati durante la calibrazione del processo di stampa e devono essere tenuti sotto controllo per evitare lo scostamento di tonalità, come mostrato nell'esempio della Figura Figura 21 (Expert Guide - Color & Quality, 2019, p. 17)

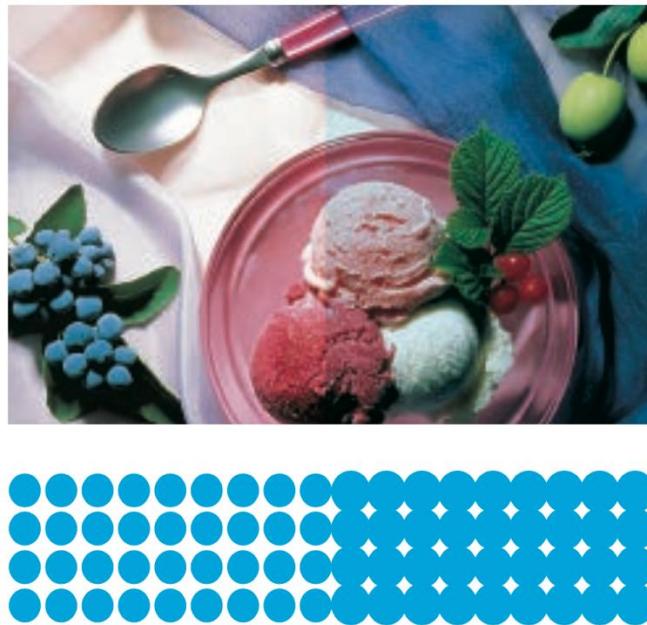


Figura 21 - Effetto dell'aumento anormale della TVI di ciano in un risultato di stampa.  
L'immagine di destra ha una dominante ciano.

TVI può essere misurato in due modi diversi: da valori densitometrici e da valori colorimetrici XYZ. Il TVI densitometrico è lo standard che è stato utilizzato per molti anni e di solito è riferito semplicemente con le parole "TVI" o "Dot Gain". Il TVI colorimetrico viene calcolato dal tristimolo XYZ e viene utilizzato quando i dati densitometrici non sono disponibili o non possono essere calcolati.

Equazione 5 - Calcolo TVI da valori densitometrici

$$TVI = 100 \left( \frac{1 - 10^{-(D_T - D_P)}}{1 - 10^{-(D_S - D_P)}} \right) - TV, \quad \text{dove}$$

*TV è il valore tonale del file digitale espresso in percentuali 0 – 100*

*D<sub>T</sub> è il fattore di riflettanza della densità del mezzotono*

*D<sub>P</sub> è il fattore di riflettanza della densità del substrato o carta*

*D<sub>S</sub> è il fattore di riflettanza della densità del solido*

*NOTA: il filtro di densità R, G, o B deve essere selezionato secondo l'inchiostro da misurare*

Equazione 6 - Calcolo TVI da valori colorimetrici XYZ

$$TVI_C = 100 \left( \frac{X_P - X_T}{X_P - X_S} \right) - TV, \quad TVI_M = TVI_K = 100 \left( \frac{Y_P - Y_T}{Y_P - Y_S} \right) - TV,$$

$$TVI_Y = 100 \left( \frac{Z_P - Z_T}{Z_P - Z_S} \right) - TV, \quad \text{dove}$$

*TV è il valore del tono del file digitale in percentuale 0 – 100*

*X<sub>T</sub>Y<sub>T</sub>Z<sub>T</sub> sono i valori di tristimolo del mezzotono*

$X_P Y_P Z_P$  sono i valori di tristimolo del substrato o carta

$X_S Y_S Z_S$  sono i valori di tristimolo del solido

Si prega di notare che le variazioni nella curva TVI durante la calibrazione della stampa o durante la tiratura non sono direttamente correlate alle differenze visive introdotte. Questo è uno dei motivi per cui i due metodi proposti nelle sezioni 2.10 e 2.12 di seguito divergono. Nonostante le diverse opinioni, TVI è ancora il modo più semplice per tenere sotto controllo i fenomeni di dot gain, anche se potrebbe non essere il più accurato.**Error! Reference source not found.** 2.12 below

## 2.6. Il grigio nell'era moderna della stampa

Abbiamo visto nella sezione 2.4 sopra che la maggior parte delle immagini grigie sono stampate utilizzando la combinazione di inchiostro CMYK, con l'inchiostro K che dona un certo contributo al risultato, a seconda del livello GCR. 2.4 più sopra

Una delle ricerche più importanti pubblicate in età moderna è stata fatta da Karl Heinz Shirmer nel 1955 e pubblicata in Germania (Schirmer, 1955). Shirmer spiega che il grigio riprodotto con un processo di stampa composto da tre coloranti non è un vero grigio, perché la riflettanza spettrale è ben lungi dall'essere idealmente piatta, come mostrato nella Figura Figura 22.

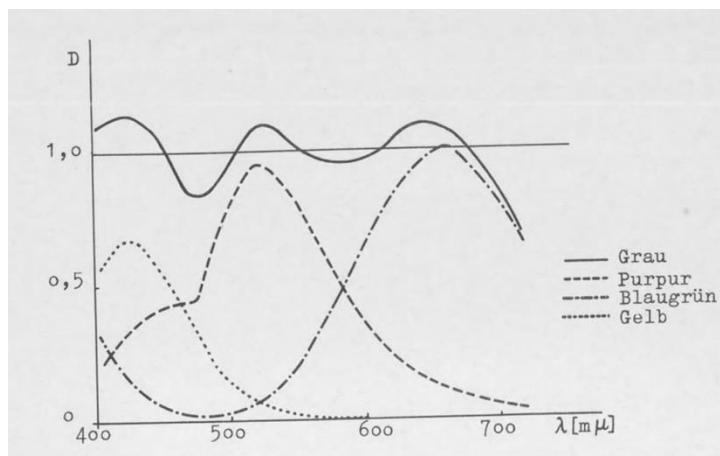


Figura 22 - Funzione di densità spettrale di un grigio composto da tre coloranti Agfa (Schirmer, 1955, p. 8)  
(Si noti che le lunghezze d'onda sono etichettate come millesimi di  $\mu\text{m}$  invece di usare la dicitura  $\text{nm}$ )

Shirmer riassume anche le basi del processo di calibrazione del grigio, che contiene molti concetti che sono ancora utilizzati oggi:

- Una miscela di inchiostri C, M e Y nella stessa proporzione non dà un grigio perché la tonalità cambia, tipicamente con un viraggio marrone, a causa dell'ordine in cui tali inchiostri vengono stampati.
- La spiegazione può essere trovata principalmente in alcuni comportamenti additivi del processo di stampa a mezzitonni sottrattiva.
- La deviazione può essere descritta come una sovrapposizione dei dot gain (oggi chiamato Tonal Value Increase - TVI - come spiegato nella sezione 2.5 sopra) dei diversi inchiostri.**Error! Reference source not found.**

- La compensazione potrebbe essere calcolata linearmente nello spazio tonale e ha un effetto logaritmico nel dominio della densità dell'inchiostro, come mostrato nella Figura Figura 23.
- La compensazione può essere effettuata sia nei processi di stampa che nel processo fotografico all'origine delle pellicole (oggi non più utilizzato, si applica sui file digitali) con gli stessi risultati.

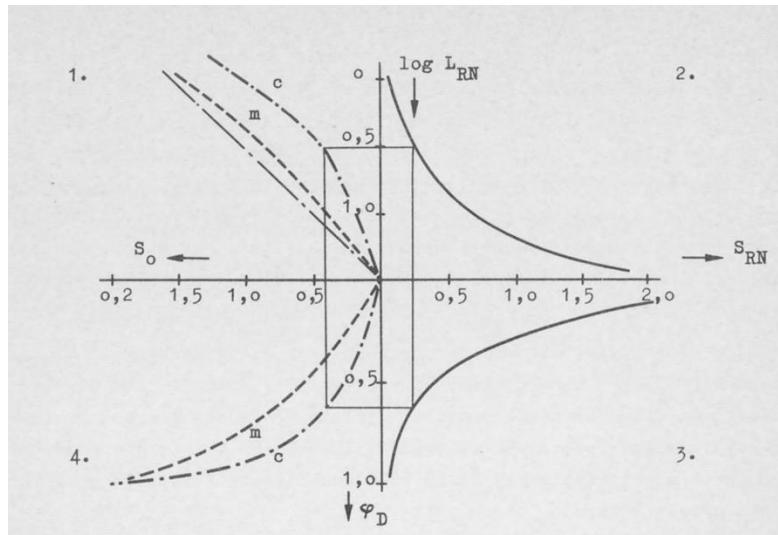


Figura 23 - Correlazione di Schirmer delle curve di guadagno dei punti e delle densità logaritmiche nel bilanciamento dei grigi (Schirmer, 1955, p. 31)

Il lavoro dello Shirmer è molto importante perché riassume tutti gli insegnamenti pervenuti in quegli anni principalmente dagli Stati Uniti e dalla Germania, descrivendo anche la riproduzione dei colori grigi in termini matematici. Il lavoro di Shirmer non sarebbe stato possibile senza il modello di Murray per prevedere la riproduzione del tono presentato nel 1936 (Murray, 1936), esteso l'anno successivo da Neugebauer per i processi di stampa (Neugebauer, 1937). In quella epoca, il processo CMYK era stampato utilizzando una macchina da stampa a singolo inchiostro, ripetendo il processo quattro volte cambiando la configurazione da C, M, Y, a K ink in sequenza: questo era alquanto inefficiente e ha introdotto molta variabilità nei risultati finali.

Dal 1960 ad oggi, la riproduzione dei grigi con processi di stampa CMYK è diventato un argomento molto popolare, a causa della maggiore disponibilità di macchine da stampa a quattro inchiostri in tutte le applicazioni e in tutto il mondo, ma è solo dai primi anni 2000 che la tecnologia consente processi di stampa abbastanza stabili da fornirne una buona riproduzione. Ad esempio, i giornali in Europa hanno adottato la stampa CMYK per le immagini meno di 15 anni fa.

## 2.7. Definizione di grigio

Quando un colore può essere definito "grigio"?

Le definizioni standard trovate nel dizionario di Oxford o negli standard ISO definiscono il colore grigio come un "colore intermedio tra bianco e nero, come cenere o piombo". È una definizione vaga, ma introduce le prime due dipendenze: il grigio dipende da dei riferimenti di bianco e nero.

Per essere più precisi, dobbiamo definire un contesto e fissarlo in un sistema colorimetrico. Scegliendo il sistema colorimetrico standard CIE 1931 e puntando al diagramma di cromaticità xy della Figura Figura 24, possiamo dire che tutti gli stimoli di uguale energia nel centroide del diagramma ( $x_E = y_E = 1/3$ ) sono grigi, inclusi il bianco e il nero.

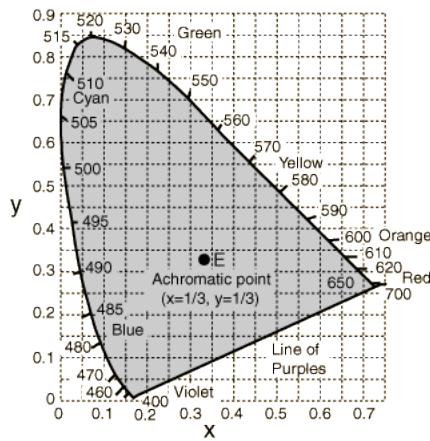


Figura 24 - Diagramma di cromaticità CIE 1931

La definizione di cui sopra funziona bene in applicazioni come la televisione o la codifica di immagini digitali, quando l'unica variabile è il punto di bianco con il quale viene calcolato XYZ, chiamato illuminante di riferimento. La stampa su un materiale opaco, come la carta, è considerata un caso riflettente e dalle formule utilizzate per calcolare la cromaticità xy è chiara la dipendenza dall'illuminante di riferimento e dall'osservatore scelto:

Equazione 7 - Calcolo delle coordinate di cromaticità xy da valori spettrali

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \cdot \frac{1}{X + Y + Z}, \quad \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \frac{1}{N} \int_{\lambda} \begin{pmatrix} \bar{x}(\lambda) \\ \bar{y}(\lambda) \\ \bar{z}(\lambda) \end{pmatrix} S(\lambda) I(\lambda) d\lambda, \quad N = \int_{\lambda} \bar{y}(\lambda) I(\lambda) d\lambda$$

dove  $\left\{ \begin{array}{l} \bar{x}, \bar{y}, \bar{z} \text{ sono le funzioni dell'osservatore standard CIE} \\ S \text{ è la riflettanza spettrale del campione} \\ I \text{ è la distribuzione spettrale della potenza dell'illuminante di riferimento} \end{array} \right.$

Per le arti grafiche, l'illuminante di riferimento CIE D50 e l'osservatore 2° sono definiti come standard per tutti i calcoli colorimetrici, come spiegato nella precedente sezione 2.3.1. Quando il colore ha la stessa energia nello stimolo XYZ, può essere considerato acromatico sotto l'illuminante di riferimento e l'osservatore. In questo contesto, tutti i colori con Y nell'intervallo [0, 1] che soddisfano la condizione cromatica  $x = y = 1/3$  sono grigi. 2.3.1 più sopra

Tuttavia, stampare significa aggiungere inchiostri a un substrato usando colori primari, seguendo la teoria sottrattiva. Quindi, in un processo di stampa CMYK il bianco più bianco che è possibile ottenere è quello del substrato (carta). Questo bianco carta ha una specifica coordinata colorimetrica XYZ in condizioni D50/2° che raramente corrisponderà perfettamente alla condizione acromatica grigia

espressa in precedenza. Siamo in una situazione in cui due diversi riferimenti bianchi si scontrano nel nostro sistema di visione: il riferimento bianco dell'illuminante e il riferimento bianco della carta. Poiché non è possibile prevedere in quale condizione il nostro occhio si adatterà, dato che questo meccanismo dipende da molti fattori come la posizione del campione e la quantità di area di carta non stampata, una strategia comune è considerare un compromesso tra entrambi.

Ci sono diversi compromessi che possono essere utilizzati, ad esempio:

- Il grigio è un colore che ha la stessa cromaticità della carta
- Il grigio è un colore che ha la stessa cromaticità di un tono K con della medesima luminanza
- Il grigio è un colore con cromaticità che va da quello della carta nelle alte luci a una perfetta acromaticità nella luminanza più bassa ottenibile

L'ultimo è il compromesso adottato dalla ISO 12647-2:2013 (ISO 12647-2:2013 Graphic technology — Process control for the production of half-tone colour separations, proof and production prints — Part 2: Offset lithographic processes, 2013), che introduce anche un fattore di correzione empirica dell'85%.

Equazione 8 - Definizione grigia secondo ISO 12647-2:2013 4.2.8

$$\begin{pmatrix} a^* \\ b^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_p^* \\ b_p^* \end{pmatrix} \left[ 1 - K \frac{L_p^* - L^*}{L_p^* - L_d^*} \right],$$

dove  $\begin{cases} L_p^*, a_p^*, b_p^* \text{ sono le coordinate CIELAB della carta} \\ L_d^* \text{ è la chiarezza CIELAB del colore più scuro ottenibile} \\ K = 0,85 \text{ è il fattore di adattamento visivo al bianco carta} \end{cases}$

La precondizione per utilizzare l'equazione Equazione 8 è conoscere le coordinate CIELAB della carta e la chiarezza del colore più scuro ottenibile; con questi dati tutte le coordinate cromatiche  $a^*$  e  $b^*$  possono essere calcolate per ogni  $L^*$  che va dalla carta al punto più scuro: l'intero asse grigio è ora ben definito.

L'utilizzo di CIELAB invece dello spazio colore XYZ è preferito a causa della necessità di definire tolleranze visive. Ad ogni modo, la trasformazione da XYZ a CIELAB e viceversa può essere considerata lineare (c'è una piccola non linearità nella formula ma può essere ignorata in questo contesto).

È importante affermare che il compromesso concordato nella norma ISO 12647-2 è valido per carte quasi neutre sotto D50/2° e non è testato su substrati con elevata cromaticità (ad esempio, gialli brillanti, marrone scuro, ...) che sono anche fuori dallo scopo di questo lavoro.

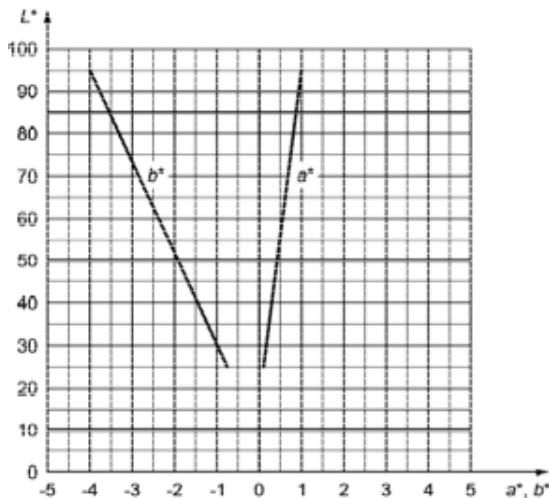


Figura 25 - Esempio di asse grigio di una condizione di stampa con coordinate CIELAB della carta di [95, 1, -4] e L\* più scuro di 25. Dalla ISO 12647-2:2013.

Come mostrato nella Figura Figura 25, nel contesto della condizione di stampa utilizzata in quell'esempio tutti i colori grigi si basano sull'asse definito e ciò che è al di fuori di questo asse oltre una certa tolleranza non può essere definito come grigio. L'asse deve essere considerato in tre dimensioni ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ) ma di solito è rappresentato con due viste  $a^*/L^*$  e  $b^*/L^*$ , per motivi pratici. Il confine tra ciò che viene percepito come grigio neutro e ciò che viene percepito come un colore è labile e dipende dal contesto e dal soggetto riprodotto dall'immagine.

Le tolleranze sull'asse grigio sono solitamente definite considerando la distanza geometrica nel piano cromatico del CIELAB, come affermato dall'Equazione Equazione 9, tuttavia non vi è accordo su quali valori possano essere considerati una pratica soglia di crominanza grigia. In altre parole, non c'è accordo quando un grigio non è più considerato un grigio neutro e inizia a diventare un colore. L'uso della dicitura "grigio quasi neutro" utilizzata nel metodo G7 (Hutcheson, 2009) non aiuta.

Equazione 9 - Formula di differenza di crominanza

$$\Delta C^* = \sqrt{(a_1^* - a_2^*)^2 + (b_1^* - b_2^*)^2}, \quad \text{dove } \begin{cases} a_1^*, b_1^* \text{ è la cromaticità del grigio desiderato} \\ a_2^*, b_2^* \text{ è la cromaticità misurata} \end{cases}$$

Riassumendo il concetto principale, la definizione del grigio nella stampa dipende da molti parametri: illuminante e osservatore di riferimento, punto di bianco del substrato non stampato, colore più scuro ottenibile e fattore di adattamento utilizzato. La definizione è ancora una semplificazione in quanto non considera il contesto e il meccanismo cognitivo dei colori di memoria.

## 2.8. Il bilanciamento del grigio nel contesto della stampa

Il bilanciamento del grigio è l'insieme dei valori C, M, Y e K che dovrebbe consentire una riproduzione grigia neutra in una specifica condizione di stampa, quindi può essere considerato un prerequisito per

## Ottimizzazione della riproduzione dei grigi nei processi di stampa CMYK

una buona riproduzione neutra nella stampa CMYK. Senza sapere come ottenere il grigio desiderato, è molto inefficiente, e quasi impossibile, farlo con un processo "prova e ripeti".

È una funzione diretta di:

- Tonalità degli inchiostri cromatici C, M e Y. Nella maggior parte dei processi il nero K è acromatico, ma in alcuni di essi anche K ha una certa influenza.
- Spessore o densità del film d'inchiostro.
- Curva TVI di ogni inchiostro CMYK.

Ci sono altri fattori che influenzano il risultato come: sequenza di colori durante il processo di stampa, trapping dell'inchiostro, interreferenze di retinatura tra i colori; tali fattori dipendono dalla tecnologia.

Se gli inchiostri di processo CMYK fossero filtri di colore perfetti, allora una quantità uguale di C, M e Y potrebbe essere stampata sovrapposta e il sistema di visione riceverebbe la stessa quantità di luci opposte rosse, verdi e blu. Questo risultato sarebbe visto come un grigio neutro, rispetto al punto bianco del substrato. (FIRST - Flexographic Image Reproduction Specifications and Tolerances, 2009, p. 93)

Nel mondo reale, i pigmenti che compongono i colori di processo non sono così puri come la teoria e la contaminazione porta a errori di tonalità. Poiché il grigio neutro richiede la stessa quantità di luci di colore opposto riflesse dalla stampa, la quantità di C, M e Y stampati deve essere regolata per compensare gli errori di tonalità: di solito la quantità di M e Y deve essere ridotta, rispetto a C, come descritto matematicamente da Schirmer (Schirmer, 1955, p. 22,23,24). Un esempio di errori di tonalità può essere visto nella Figura Figura 26.



Figura 26 - Esempio di set di immagini di bilanciamento del grigio perfettamente neutro (a sinistra), tonalità brunastra simulata (al centro), tonalità bluastra simulata (a destra)

Poiché tutto il processo di stampa richiede una calibrazione previa, che viene effettuata attraverso l'esposizione di una lastra di stampa o attraverso dati digitali, a seconda della tecnologia, il bilanciamento del grigio può essere inteso come una precondizione oppure come un effetto di tale calibrazione.

Quando il bilanciamento è una precondizione, le combinazioni CMYK sono fisse e predeterminate e il ruolo della calibrazione è quello di assicurare che, per tali combinazioni, il risultato sia grigio come definito nella sezione 2.7 di cui sopra.2.7 più sopra

Quando il bilanciamento è un effetto della calibrazione, le combinazioni CMYK che consentono una grigio neutro possono essere trovate analizzando la caratterizzazione di quel processo prima della calibrazione.

Entrambi gli approcci sono validi e hanno generato i due metodi utilizzati il primo negli Stati Uniti e il secondo in Europa, come spiegato nella sezione 2.12 di seguito. 2.12 più sotto

## 2.9. Riproduzione dei grigi in stampa

Un grigio neutro nella stampa CMYK può essere ottenuto concettualmente in tre modi diversi, come anticipato nella sezione 2.4 di cui sopra:2.4 più sopra

1. Utilizzando un tono composto solo da inchiostro nero (K), supponendo che l'inchiostro sia acromatico.
2. Utilizzando percentuali specifiche di toni di inchiostri ciano, magenta e giallo (CMY).
3. Utilizzando percentuali specifiche di toni di inchiostri ciano, magenta, giallo e nero (CMYK)

L'uso del solo inchiostro nero non è così comune perché, anche se la riproduzione dei grigi è solitamente colorimetricamente perfetta e molto robusta rispetto alle variazioni del processo di stampa, altri attributi di qualità dell'immagine, come il grano, di solito non sono accettabili.

Al contrario, le combinazioni CMY sono instabili, perché prodotto di tre diversi contributori, ma forniscono un ottimo grano e un aspetto visivo piacevole.

Per questi motivi, nel lavoro quotidiano è comune utilizzare un mix dei due approcci, e i colori grigi sono composti da una combinazione di toni CMYK in cui, a seconda del processo di stampa stesso, K può essere più o meno dominante rispetto al contributo di CMY.

Durante il processo di calibrazione, e durante le operazioni di controllo di processo, è buona norma mantenere K come riferimento per chiarezza e tonalità per i canali di inchiostro CMY. Il controllo del canale K viene eseguito di solito in modo indipendente e il bilanciamento del grigio CMY viene messo a punto per corrispondere alla condizione di neutralità in tolleranze definite. Se CMY è neutro, l'ipotesi è che lo stesso rapporto tra C, M e Y mescolato con una certa quantità di K rimanga neutro. Questo è vero per i processi di stampa quando l'inchiostro K è neutro sull'intera gamma di toni, come offset litografico o flessografico, ma non può essere vero per i processi di stampa digitale.

La riproduzione del grigio nella stampa CMYK è quindi legata a una definizione di grigio, un bilanciamento del grigio e un processo di calibrazione che consentono una riproduzione del grigio.

La definizione dei grigi, come mostrato nella sezione 2.7, è ben standardizzata e accettata in tutto il mondo.2.7

Il bilanciamento dei grigi, al contrario, viene interpretato in modo diverso a seconda del metodo utilizzato, come spiegato nella sezione 2.8. 2.8

Pertanto, inevitabilmente, i processi di calibrazione differiranno a seconda del bilanciamento dei grigi adottato: quando il bilanciamento dei grigi è una precondizione ci sono più regole da seguire, rispetto ai metodi che ereditano il bilanciamento dei grigi dal risultato della calibrazione.

Il primo approccio che utilizza un bilancio di grigi fisso è stato codificato nel metodo G7® (Hutcheson, 2009), nato negli Stati Uniti, spiegato nella sezione 2.10 di seguito. **Error! Reference source not found.**

Il secondo approccio è emerso tra i produttori di stampanti e le aziende di stampa in Germania e più in generale in tutta Europa: poiché si basa sull'analisi del dot gain, potrebbe essere chiamato il “metodo TVI” ed è presentato nella sezione 2.11.2.11

## 2.10. Il metodo G7

G7® è un metodo introdotto nel 2006 dall'associazione IDEAlliance negli USA basato sul lavoro corale di molti esperti statunitensi, ispirato al lavoro realizzato da Ansel Adams sul Zone System citato nella sezione 2.2 sopra, e ispirato anche dalla sua ricerca sulle tecniche di sviluppo di carte sensibili fotografiche. Il nome G7 deriva dalle sette zone grigie utilizzate per controllare la riproduzione nella prima versione dello standard.2.2 più sopra

G7 contiene sia una definizione dell'aspetto della scala di grigi, sia un metodo di calibrazione indipendente dal dispositivo per i processi di stampa CMYK che utilizzano curve mono-dimensionali. (Hutcheson, 2009, p. 4)

### 2.10.1. Definizione dei grigi

La principale innovazione del G7 è che definisce il modo in cui una scala di grigi dovrebbe apparire all'occhio umano, indipendentemente dal processo di stampa. Il contrasto nelle luci viene mantenuto, indipendentemente dalla gamma dinamica, mentre i valori di tono più scuri vengono compressi o espansi per soddisfare le capacità o adattarsi alle limitazioni del processo di stampa. Ciò significa che la stessa immagine stampata su diversi processi di stampa con diverse gamme dinamiche mostrerà una chiarezza relativa e un contrasto percepito costanti.

G7 utilizza la densità colorimetrica Y relativa del substrato chiamata Neutral Print Density (NPD), il cui valore è approssimativamente uguale alla densità dello stato visivo ISO 5:

Equazione 10 - Densità di stampa neutra di XYZ

$$NPD = -\log_{10} \left( \frac{Y}{Y_S} \right), \quad \text{dove } Y_S \text{ è il fattore di riflettanza luminosa del substrato}$$

NPD consente di utilizzare una procedura di calibrazione manuale basata su un grafico a ventaglio, che necessita solo di una matita e di un densitometro, come mostrato nella Figura Figura 27, riducendo le esigenze di strumenti sofisticati.

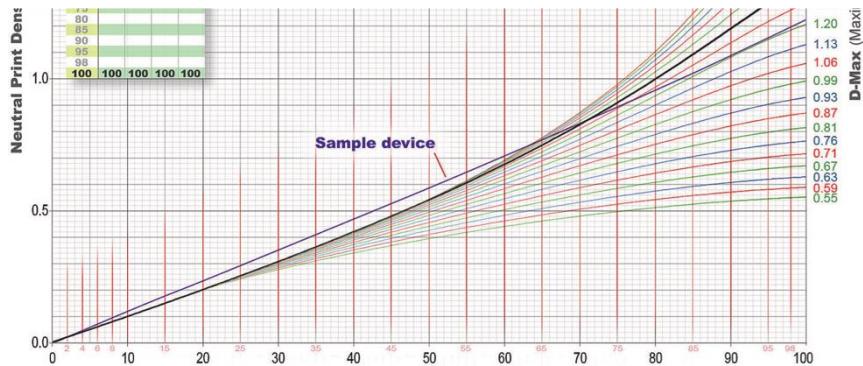


Figura 27 - Tipico grafico CMY di esempio - da G7 How-To

NPD può essere calcolato anche da misurazioni CIELAB prese da uno spettrofotometro, perdendo l'approccio visivo del grafico a ventaglio e richiedendo un foglio di calcolo o un software. Questa è l'implementazione G7 più utilizzata oggi poiché è incline a essere automatizzata.

## 2.10.2. Bilanciamento dei grigi

G7 utilizza un modo unico per correlare il bilanciamento dei grigi con la loro riproduzione e si basa su due pilastri fondamentali: la scala tonale a 3 colori “quasi neutra” e le curve NPD target.

La scala tonale a 3 colori “quasi neutra” è definita come un insieme di terne di valori di tono C, M e Y che hanno la relazione definita dall'equazione Equazione 11 (TR 015-2015 — Graphic technology — Methodology for Establishing Printing Aims Based on a Shared Near-neutral Gray-scale, 2015):

Equazione 11 - Scala tonale “quasi neutra” G7

$$M = Y = 0.747 \cdot C - 4.1 \cdot 10^{-4} \cdot C^2 + 2.94 \cdot 10^{-5} \cdot C^3,$$

dove  $C$  è il valore tonale del ciano nell'intervallo  $[0 - 100]$ ,

$M$  e  $Y$  sono i valori tonali di magenta e giallo

Le curve NPD obiettivo per CMY e K possono essere calcolate con le formule fornite dai paragrafi 5.4 e 5.5 del CGATS TR015 (TR 015-2015 — Graphic technology — Methodology for Establishing Printing Aims Based on a Shared Near-neutral Gray-scale, 2015), poiché le formule sono piuttosto complesse e fuori portata per questo documento, nell'equazione seguente ne riassumiamo soltanto le dipendenze: più sotto

Equazione 12 - Funzione concettuale per il calcolo di NPD

$$NPD(TV) = f(Y_D, Y_L, Y_R(TV), Y_C, R_A, R_R),$$

dove

$Y_D$  = fattore di riflettanza luminosa dell'estremo più scuro della scala dei neri

$Y_L$  = fattore di riflettanza luminosa del substrato (carta)

$Y_R(TV)$  = fattore di riflettanza luminosa corrispondente alla curva NPD di riferimento

$Y_C$  = punto di controllo lungo la curva NPD in cui viene iniziato il ridimensionamento di  $Y_R$

$R_A$  = intervallo di riflettanza effettivo basato sugli estremi più chiari e più scuri della scala tonale

$R_R$  = rapporto di riflettanza utilizzato per regolare il ridimensionamento successivo dei dati

L'NPD definisce solo la chiarezza ( $L^*$ ) dei riferimenti, vengono fornite formule aggiuntive per completare la definizione nel piano di crominanza ( $a^*, b^*$ ) come mostrato nell'equazione Equazione 13.

Equazione 13 – scala cromatica G7 CMY “quasi neutra” - da CGATS TR015

$$\begin{pmatrix} a^*(TV_C) \\ b^*(TV_C) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_S^* \\ b_S^* \end{pmatrix} \left(1 - \frac{TV_C}{100}\right),$$

dove

$a^*(TV_C), b^*(TV_C)$  sono i valori di crominanza modificati,

$a_S^*, b_S^*$  sono i valori di crominanza del substrato (carta),

$TV_C$  è il valore tonale dei ciano della scala quasi neutra CMY

Una volta calcolate le curve NPD, sia il bilanciamento del grigio che la definizione del grigio possono essere considerati ben definiti.

### 2.10.3. Calibrazione

La calibrazione G7 viene effettuata utilizzando la metrica NPD con un processo in 2 fasi:

1. Calibrare le curve NPD di K e CMY al riferimento NPD calcolato come spiegato nella sezione precedente
2. Ottimizzare le curve M e Y per ottenere una buona crominanza grigia ( $a^*$  e  $b^*$ ) utilizzando il riferimento calcolato con l'equazione Equazione 13

Non ci sono dettagli su come calibrare le curve: vengono forniti un software commerciale di riferimento e alcuni grafici di utilità, ma la matematica dietro l'algoritmo non è condivisa pubblicamente.

## 2.11. Il metodo TVI

Il metodo di calibrazione ampiamente utilizzato in Europa si basa sulla calibrazione del dot gain e, come spiegato nella sezione 2.9 di cui sopra, non considera il bilanciamento del grigio come parametro di input, come effettuato dal G7. Poiché non è codificato in modo univoco, più che un metodo può essere considerato una combinazione di *best practices* che ogni utente può adattare alle sue esigenze. **Error!**

**Reference source not found.** Queste raccomandazioni provengono dalla tradizione scolastica tedesca, dall'istituto *Forschungsinstitut für Medientechnologien* (FOGRA) e dall'associazione *Bundesverband Druck und Medien* (BVDM); gli obiettivi e le tolleranze sono descritti anche nell'attuale norma ISO 12647-2:2013 (ISO 12647-2:2013 Graphic technology — Process control for the production of half-tone colour separations, proof and production prints — Part 2: Offset lithographic processes, 2013).

Il punto di partenza del metodo di calibrazione TVI di un processo di stampa CMYK consiste nel fissare una condizione di stampa in cui il 100% di solidi C, M, Y e K corrisponde a obiettivi predifiniti entro alcune tolleranze. ISO 12647-2 definisce tali target e tolleranze come valori CIELAB e differenze di colore, ma gli standard precedenti utilizzavano la densitometria anziché la colorimetria. Il modo in cui raggiungere tali obiettivi dipende dalla tecnologia di stampa utilizzata.

Per misurare le curve TVI (vedere paragrafo 2.5) dalle condizioni di stampa effettive, il modulo di stampa o la curva di compensazione digitale devono essere impostati come identità. Significa che ciò che è necessario è misurare l'aumento naturale del valore tonale di ogni inchiostro C, M, Y e K senza alcuna calibrazione applicata. Di solito questo viene fatto con uno speciale diagramma di prova che contiene una scala a quattro colori che consente questa misurazione, come mostrato in Figura **Error!**

**Reference source not found.**Figura 28, di solito effettuata con un densitometro, in alcuni casi con uno spettrofotometro.



Figura 28 - Scala di calibrazione CMYK TVI di un modulo di file di stampa di prova – da una forma test di TAGA Italia

L'obiettivo del processo è quello di portare le curve misurate, come mostrato nella Figura Figura 20, a curve TVI definite da alcuni standard come, ad esempio, il FOGRA52 mostrato nella Figura Figura 19. La trasformazione dalla curva misurata alla curva target è un problema mono-dimensionale che deve essere ripetuto per ogni inchiostro in modo indipendente: in un processo CMYK devono essere calcolate quattro diverse curve di compensazione.

## Ottimizzazione della riproduzione dei grigi nei processi di stampa CMYK

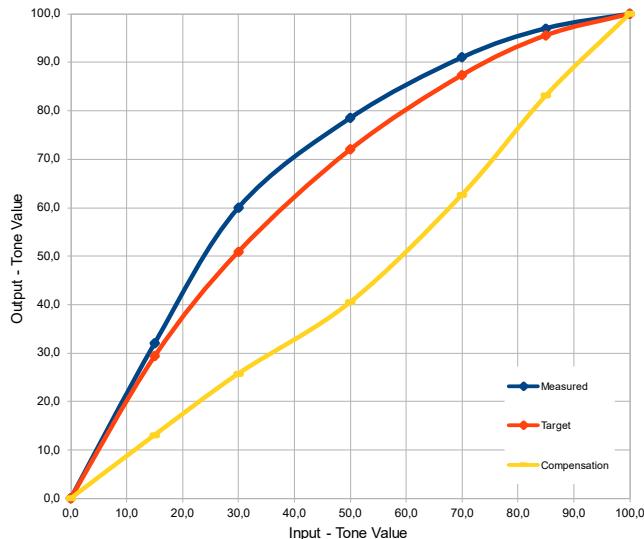


Figura 29 - Esempio di calibrazione TVI, mostrata nel dominio TV

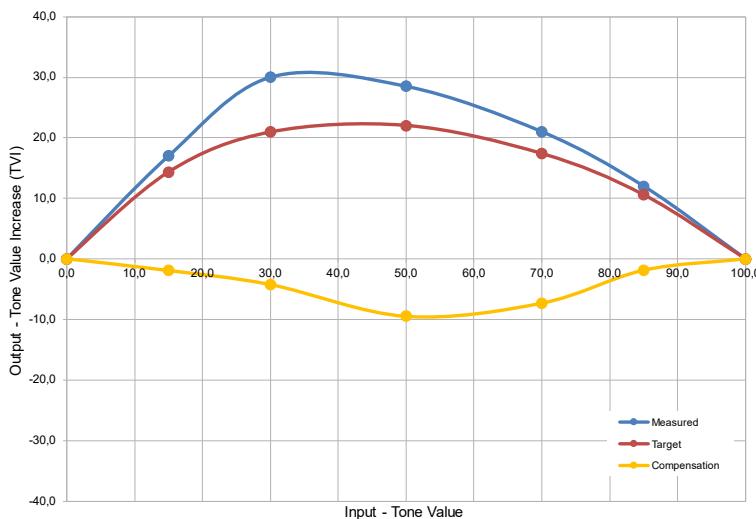


Figura 30 - Esempio di calibrazione TVI, uguale alla Figura 29 ma nel dominio TVI

Equazione 14 - Processo di calibrazione TVI generico

$$TVI_F = \text{comp}(TVI_M, TVI_T),$$

dove:

$TVI_F$  è la curva TVI finale

$TVI_M$  è la curva TVI misurata

$TVI_T$  è la curva TVI obiettivo

$\text{comp}(\ )$  è la funzione di compensazione

Possiamo esprimere la calibrazione come una funzione generica che trasforma la curva TVI misurata usando una funzione di compensazione o una curva. Questa curva di compensazione deve essere calcolata per ogni inchiostro e dipende sia dalle curve TVI misurate che da quelle target, come mostrato dall'equazione Equazione 14. Quindi, la calibrazione di una specifica condizione di stampa CMYK su

un target definito è in realtà il calcolo di quattro diverse curve di compensazione, una per ogni colore primario.

Come si può vedere, tutto il processo viene eseguito utilizzando valori TVI densitometrici e non si sta prendendo in considerazione la colorimetria né l'obiettivo di definizione dei grigi da raggiungere. La calibrazione è cieca alla riproduzione dei grigi perché l'obiettivo del processo è diverso: calibrare il contrasto dei singoli canali di inchiostro rispetto a uno standard.

Il metodo TVI è in grado di ottenere un discreto bilanciamento del grigio solo se gli inchiostri CMY sono ben bilanciati tra loro e il naturale guadagno di punti di stampa non sta introducendo grandi variazioni nelle singole curve TVI.

ISO 12647-2, lo standard che descrive il controllo del processo litografico offset, fornisce obiettivi normativi e tolleranze per le curve TVI, aggiungendo una tolleranza di diffusione (*spread*) intesa come differenza massima consentita tra le curve C, M e Y nel valore del tono medio del 50%. La nota 2 della sezione 4.2.8 della norma dice: *"Il bilanciamento dei grigi di un determinato processo di stampa può essere utilizzato per la calibrazione del processo e il controllo del processo, purché non vengano superate le tolleranze per l'aumento del valore del tono e la diffusione del tono medio come definito nella tabella 11."* (ISO 12647-2:2013 Graphic technology — Process control for the production of half-tone colour separations, proof and production prints — Part 2: Offset lithographic processes, 2013)

Significa che quando si seguono le tolleranze di calibrazione TVI, è possibile una sorta di riproduzione dei grigi, ma questa deve essere controllata utilizzando altri framework e strumenti.

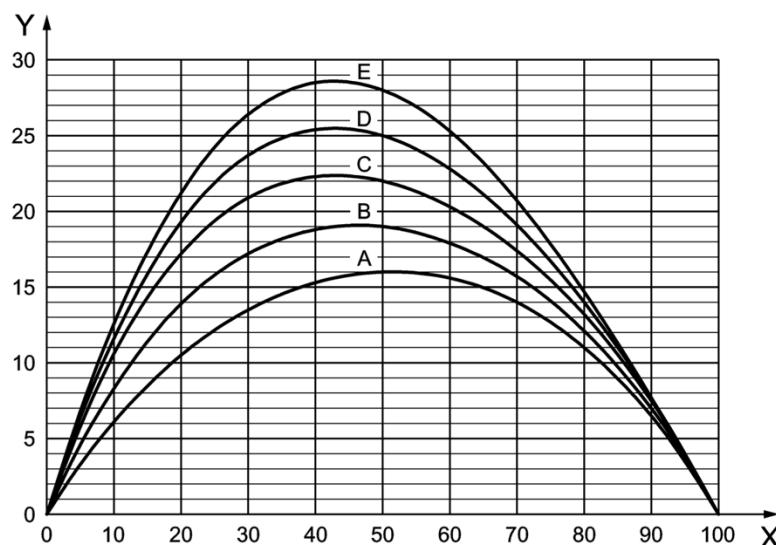


Figura 31 - Curve TVI delle condizioni di stampa standard ISO 12647-2:2013

Tone value of control patch	Values in percent	
	Deviation tolerance	Variation tolerance
	OK print	Production print
< 30	3	3
30 to 60	4	4
> 60	3	3
Maximum mid-tone spread	5	5

Figura 32 - La Tabella 11 della norma ISO 12647-2:2013: tolleranze TVI e massima diffusione del tono medio per la calibrazione (colonna "OK print")

Il metodo di calibrazione TVI può essere applicato in tutti i processi di stampa tradizionali come flessografia, rotocalco, serigrafia, con modifiche minime o nulle, ed è compatibile solo con alcuni processi di stampa digitale. Ad esempio, è possibile calibrare una HP Indigo® come mostrato nella Figura Figura 1 con TVI densitometrico, quando si utilizza la configurazione di inchiostri CMYK. Altri processi di stampa a getto d'inchiostro richiedono come minimo misurazioni e obiettivi TVI colorimetrici, come mostrato nella sezione 2.11, ma la maggior parte di essi sono calibrati utilizzando metodi e metriche differenti.2.11

## 2.12. Differenze tra i metodi G7 e TVI

Le differenze dei due metodi osservate nelle sezioni 2.10 e 2.11 possono essere riassunte nella Tabella Error! Reference source not found.2.11Tabella 3. Poiché i requisiti del metodo ISO 12647-2:2013 TVI sono più ampi rispetto allo schema di tolleranze del G7, la calibrazione TVI standard può essere considerata come una base che consente di raggiungere successivamente la condizione di bilanciamento del grigio G7.

Tabella 3 - Differenze tra i metodi di calibrazione G7 e TVI

	G7	TVI
<b>Definizione di grigio</b>	Basato su curve di riferimento NPD e substrato	In base al substrato e al colore più scuro ottenibile
<b>Bilanciamento dei grigi</b>	Fisso: stessa scala tonale "quasi neutra" per tutte le condizioni e i processi di stampa.	Variabile: a seconda del bilanciamento naturale degli inchiostri dopo la calibrazione TVI
<b>Riproduzione dei grigi</b>	Normativa: tolleranze ponderate di chiarezza e crominanza ( $w\Delta L^*$ , $w\Delta C^*$ ) derivate dalle metriche delle curve di riferimento NPD.	Solo informativa: tolleranze di crominanza ( $\Delta C^*$ )
<b>Calibrazione tonale</b>	Basato su curve di riferimento NPD	Basato su curve TVI

<b>Metodo di calibrazione</b>	Implementazione software di riferimento o grafici manuali.	L'utente è libero di utilizzare qualsiasi metodo adatto allo scopo.
<b>Misurazioni</b>	Colorimetria (densitometria utilizzata solo per il vecchio metodo manuale con NPD)	Densitometria (colorimetria necessaria solo in alcuni processi di stampa digitale)
<b>Applicabile alla stampa digitale</b>	Sì, il metodo è indipendente dal processo	Solo quando le separazioni CMYK vengono sottoposti a retinatura

Poiché il metodo G7 è stato creato con l'obiettivo di ottenere una buona riproduzione dei grigi nei diversi processi di stampa, permette senza dubbio il raggiungimento dei risultati in questo contesto. Tuttavia, il flusso di lavoro calibrato G7 funziona bene solo quando i dati originali da stampare vengono preparati utilizzando il bilanciamento dei grigi definito in 2.10.2. Tutte le caratterizzazioni di stampa standard utilizzate negli Stati Uniti, come SWOP® o GRACoL®, sono create sopra il bilanciamento del grigio G7. Quando i dati stampati vengono preparati mirando a diverse caratterizzazioni come, ad esempio, FOGRA51 o FOGRA52, il bilanciamento del grigio previsto è diverso ed è necessaria una trasformazione della gestione del colore con il rischio di introdurre errori o imprecisioni. Passare da una caratterizzazione standard G7 a una caratterizzazione di stampa personalizzata basata sul bilanciamento del grigio G7 richiede modifiche minime e il sistema di gestione del colore potrebbe trarne vantaggio per mantenere la riproduzione dei grigi sotto un controllo preciso. Anche se il metodo G7 non lo consiglia, è una pratica comune stampare direttamente i file digitali standard G7 su una stampante calibrata G7 senza alcuna gestione del colore, spesso con buoni risultati. Questo è impossibile a partire da una caratterizzazione che non ha alla base il bilanciamento dei grigi G7.2.10.2

Al momento della stesura, lo standard ISO 12647-2 è in fase di revisione da parte del comitato ISO/TC130 con l'obiettivo di includere i concetti principali del metodo G7, mantenendo obiettivi e tolleranze TVI.

## 3. Disegno e Implementazione

### 3.1. Processo di calibrazione

Il processo di calibrazione è progettato per soddisfare sia gli obiettivi e le tolleranze ISO 12647-2 TVI che G7 ed è un tentativo di unire i due metodi. In particolare, il lavoro vuole identificare benefici e possibili insidie quando si parte da dati preparati mirando a una caratterizzazione che non segue il bilanciamento dei grigi del G7: le caratterizzazioni FOGRA sono i migliori candidati perché ampiamente utilizzate in Europa.

- 1) Impostazione dei dati di input
  - a) Definizione della caratterizzazione e dei bilanciamento dei grigi
  - b) Preparazione o adattamento di una forma test che contenga tutti i diagrammi da misurare
- 2) Impostazione della stampante
  - a) Impostazione stampante e carta
  - b) Obiettivi e tolleranze CIELAB dei solidi CMYK
  - c) Obiettivi e tolleranze delle curve TVI
- 3) Tiratura lineare (non calibrata)
  - a) Ottenere gli obiettivi dei solidi di 2.b
  - b) Misurazione delle TVI non calibrate
  - c) Calcolo delle curve di compensazione
  - d) Applicare le curve di compensazione alla forma test o ai dati digitali
- 4) Tiratura calibrata
  - a) Validazione delle TVI calibrate con gli obiettivi di 2.c
  - b) Calcolo della ottimizzazione della riproduzione dei grigi per le curve M e Y
- 5) Tiratura bilanciata in grigio
  - a) Validazione delle TVI calibrate con gli obiettivi di 2.c
  - b) Validazione della riproduzione dei grigi usando differenti metriche
  - c) Validazione visual della riproduzione dei grigi, comparando i risultati con quelli ottenuti nei punti 3 e 4

Il calcolo della curva di compensazione TVI del passo 3.c verrà effettuato trasformando le curve TVI in TV e descrivendole con una regressione polinomiale lineare basata sul metodo dei minimi quadrati. Una volta che i TV sono descritti come polinomi, è possibile calcolare i punti di compensazione.

Il calcolo della riproduzione dei grigi sarà quindi effettuato con un metodo di ricerca in una LUT di possibili valori, in modo analogo alle implementazioni G7 di riferimento. Tutti i passaggi rilevanti sono implementati negli script MATLAB, con l'aiuto intermedio di file Excel o software esterni di conversione dei vari formati.

### 3.2. Definizione dei grigi

La definizione dell'asse dei grigi è stata fatta seguendo il metodo standardizzato nella ISO 12647-2:2013 (ISO 12647-2:2013 Graphic technology — Process control for the production of half-tone colour separations, proof and production prints — Part 2: Offset lithographic processes, 2013) e descritto nella sezione 2.7 di cui sopra. Il substrato scelto è candidato a corrispondere alla caratterizzazione FOGRA51 (Characterisation data for relevant printing conditions, s.d.), che è uno standard per la stampa offset litografica CMYK su carta patinata utilizzando retinatura periodica. 2.7 più sopra

Tabella 4 - Confronto del substrato con la caratterizzazione standard FOGRA51

Substrato	Carta patinata Lecta GardaGloss 150gr/m <sup>2</sup>
Punto di bianco (misurato)	L*=94,80 a*=1,17 b*=-5,85
Punto di bianco (da FOGRA51)	L*=95,00 a*=1,50 b*=-6,00
Differenza del punto di bianco	0,48 ΔE <sub>00</sub>
Colore più scuro ottenibile (da FOGRA51)	L*=11,43

Poiché il punto di bianco del substrato è inferiore a  $2 \Delta E_{00}$  dal punto di bianco FOGRA51, come suggerito dallo standard la deviazione potrebbe essere considerata tolleranza di produzione e l'asse grigio FOGRA51 originale può essere calcolato con la formula proposta nella sezione 4.2.8 della ISO 12647-2:2013 (ISO 12647-2:2013 Graphic technology — Process control for the production of half-tone colour separations, proof and production prints — Part 2: Offset lithographic processes, 2013). Come illustrato nella Figura Figura 33, l'asse grigio è rappresentato in proiezioni a\* e b\* da L=95 a L=11,43 come linee nere rette.

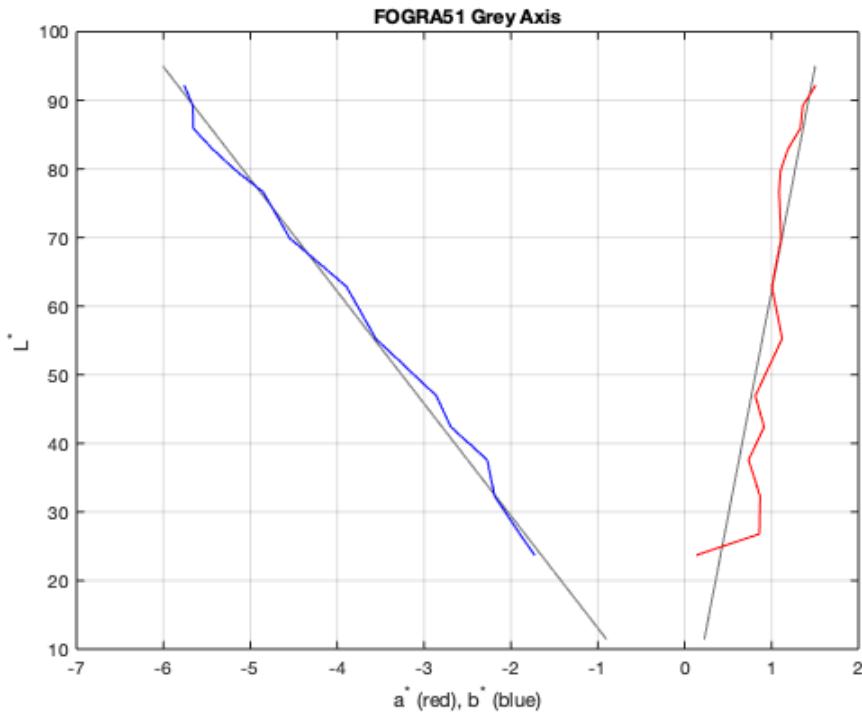


Figura 33 - Asse grigio teorico (nero) e obiettivo di riproduzione previsto, considerando la quantizzazione a 8 bit utilizzata nelle immagini TIFF

L'asse grigio risultante è mostrato nella tabella **Error! Not a valid bookmark self-reference.**, dove la colonna TV si riferisce all'equivalente TV del canale K, in percentuale.

Tabella 5 - FOGRA51\_GreyAxis.txt output del codice MATLAB Grey\_Balance\_Extractor.m

TV	CMYK_C	CMYK_M	CMYK_Y	CMYK_K	LAB_L	LAB_A	LAB_B
5	3,53	2,75	2,75	0,00	92,20	1,51	-5,76
10	7,45	5,49	5,49	0,00	89,24	1,36	-5,66
15	11,76	8,63	8,24	0,00	85,93	1,33	-5,66
20	15,69	11,37	10,98	0,00	82,97	1,19	-5,44
25	20,00	14,51	14,12	0,00	79,69	1,10	-5,16
30	23,92	17,65	17,25	0,00	76,62	1,09	-4,85
40	32,55	24,71	23,92	0,00	69,91	1,11	-4,55
50	41,57	32,55	31,76	0,00	62,87	1,00	-3,89
60	51,37	41,96	40,39	0,00	55,25	1,12	-3,55
70	62,35	52,94	51,37	0,00	46,92	0,81	-2,86
75	68,24	59,61	57,65	0,00	42,37	0,91	-2,69
80	74,51	66,67	65,10	0,00	37,59	0,73	-2,27
85	81,57	76,08	74,12	0,00	32,29	0,87	-2,19
90	90,59	88,63	86,27	0,00	26,79	0,86	-1,90
95	97,65	99,22	97,65	0,00	23,67	0,13	-1,73

Utilizzando un profilo ICC solo CMY creato dalla caratterizzazione FOGRA51 (Characterisation data for relevant printing conditions, s.d.), è possibile calcolare il bilanciamento dei grigi in termini di combinazioni C, M, Y di valori discreti incrementali di  $L^*$  ottenuti dal corrispondente valore  $L^*$  di un campionamento uniforme del canale K con incrementi del 5% (dal 5% al 95% per un totale di 15 punti noti)

I valori CMY corrispondenti, espressi in virgola mobile, vengono quindi arrotondati a 8 bit e i valori  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  previsti vengono ricalcolati. La logica alla base di questo passaggio deve essere trovata nel contesto dell'uso di un processo di stampa calibrato con grigi neutri: di solito la neutralità del grigio è desiderata e valutata nella stampa di immagini. Il formato di file immagine più comune utilizzato negli ambienti grafici professionali è il TIFF CMYK a 8 bit. Inoltre, nei flussi di lavoro quando le immagini sono fornite in RGB a 8 o 16 bit, le trasformazioni di colore possono o non possono essere eseguite in virgola mobile o a 16 bit: 8 bit è la minima qualità implementata dai diversi fornitori di tecnologia. Descrivere e valutare l'asse grigio considerando l'arrotondamento di quantizzazione a 8 bit, consente di calibrare un processo considerando il caso peggiore di definizione dell'immagine.

Il risultato dell'asse dei grigi arrotondato a 8 bit, limitato all'intervallo di luminanza ottenuto da K [5-95%], può essere visto nella Figura Figura 33 espressa dalle linee rosse e blu e sarà il nostro obiettivo per la riproduzione dei grigi.

Questi passaggi sono implementati nello script MATLAB Grey\_Balance\_Extractor.m il cui diagramma di flusso è mostrato nella Figura Figura 34.

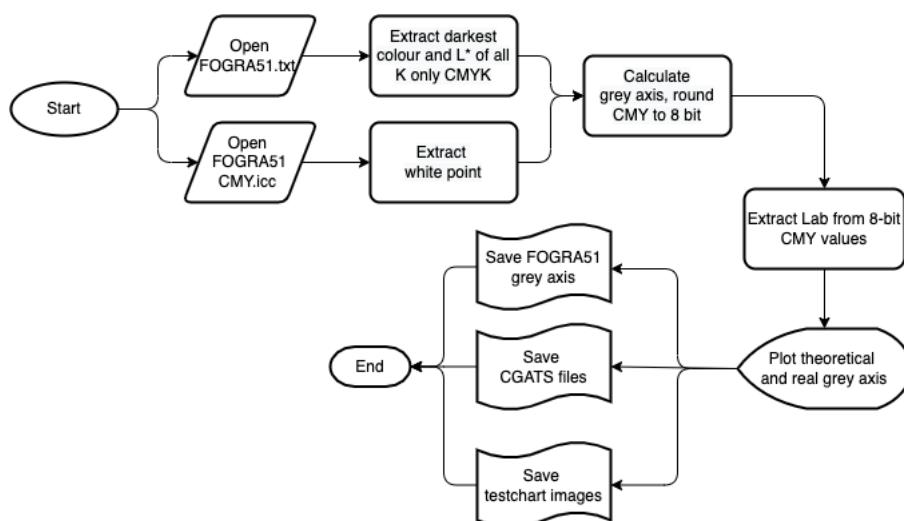


Figura 34 – Diagramma di flusso di Grey\_Balance\_Extractor.m

Lo script accetta in input:

- FOGRA51.txt: Caratterizzazione FOGRA51 fornita nel formato di file CGATS da FOGRA (Characterisation data for relevant printing conditions, s.d.)
1. FOGRA51 CMY.icc: profilo ICC CMY creato dalla caratterizzazione FOGRA51 con un software profiler dedicato

## Ottimizzazione della riproduzione dei grigi nei processi di stampa CMYK

- CIELABD50.icc: profilo ICC sintetico necessario a MATLAB per eseguire trasformazioni da CMY a CIELAB e da CIELAB a CMY
- Passi arbitrari in scala di grigi [5 10 15 20 25 30 40 50 60 70 75 80 85 90 95]
- PSOCoated\_v3.icc: profilo ufficiale CMYK ICC per la caratterizzazione FOGRA51, utilizzato per verificare i dati

E fornisce in output:

FOGRA51\_GreyAxis.txt: Riepilogo dei valori di bilanciamento CMY e dei CIELAB obiettivo, come mostrato nella Tabella L'asse grigio risultante è mostrato nella tabella **Error! Not a valid bookmark self-reference.**, dove la colonna TV si riferisce all'equivalente TV del canale K, in percentuale.

- Tabella 5. Si noti che la tabella è definita utilizzando solo valori CMY (K è zero), perché una delle ipotesi dell'intero processo è che il canale K non aggiunga cromaticità. Questo presupposto potrebbe non essere vero in tutti i processi di stampa.
- Diagrammi di prova e file CGATS di riferimento per stampare, misurare e mettere a punto la riproduzione dei grigi.

### 3.3. Calibrazione

Il processo di calibrazione è il più manuale e complesso dell'intero studio perché dipende da molti dettagli relativi alla tecnologia di stampa scelta e dagli strumenti disponibili. Il test è stato effettuato alle seguenti condizioni:

Tabella 6 - La condizione di stampa di prova

Tecnologia di stampa:	Stampante elettrofotografica CMYK HP Indigo® 12000 HD Retinatura periodica di uscita a 150 lpi (linee per inch)
Spettrofotometri:	X-Rite eXact, X-Rite i1 rev.2 e Konica Minolta FD-9, tutti compatibili con ISO 3664 M1
Substrato:	Lecta GardaGloss carta patinata lucida 150 gr/m <sup>2</sup>
Software e strumenti:	Microsoft Excel® per convalide rapide in sala stampa MathWorks® MATLAB® per la preparazione e post validazione X-Rite i1Profiler® e BabelColor Patch Tool® per la preparazione dei diagrammi di prova Immagini di valutazione BVDM Roman16® (Roman16 BVDM Reference Images, s.d.) Adobe Illustrator® per la preparazione della forma test Callas pdfToolbox® per la verifica finale del PDF

#### 3.3.1. La forma test

È stata creata una forma test di 7 pagine considerando tutti i requisiti del flusso di lavoro di stampa, gli spettrofotometri e il software utilizzato. La creazione della forma test prende in considerazione l'area di stampa massima della macchina da stampa, l'eventuale non uniformità delle immagini stampate e i limiti imposti dagli spettrofotometri utilizzati. La forma è stata creata utilizzando Adobe Illustrator™ e i grafici sono stati generati dagli script MATLAB o da software disponibili in commercio come, ad esempio, Babel Color Patch Tools™. Le immagini utilizzate provengono dal set di immagini di riferimento BVDM Roman16 (Roman16 BVDM Reference Images, s.d.), creato appositamente per la valutazione visiva di diverse aree di colore nella stampa.

Le prime pagine permettono di misurare le diverse caratteristiche della stampa con spettrofotometri, le ultime pagine contengono immagini e vengono utilizzate per la valutazione e il confronto visivi.

## Ottimizzazione della riproduzione dei grigi nei processi di stampa CMYK

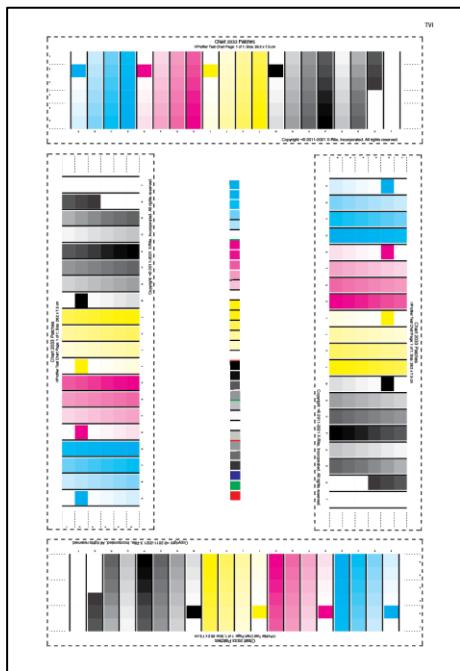


Figura 35 – Forma test pagina 1: Calibrazione TVI

La pagina TVI viene utilizzata nella prima fase della calibrazione e contiene i diagrammi per misurare TVI. Per mitigare la variabilità dell'omogeneità di stampa, vengono stampati quattro diagrammi ruotati di 90° ciascuno nella pagina. Il diagramma rapido centrale viene utilizzato da un foglio Excel per convalidare rapidamente la conformità della stampa (al di fuori dello scopo di questo studio), secondo il processo di controllo della qualità della produzione stabilito dalla società ospitante corGae.

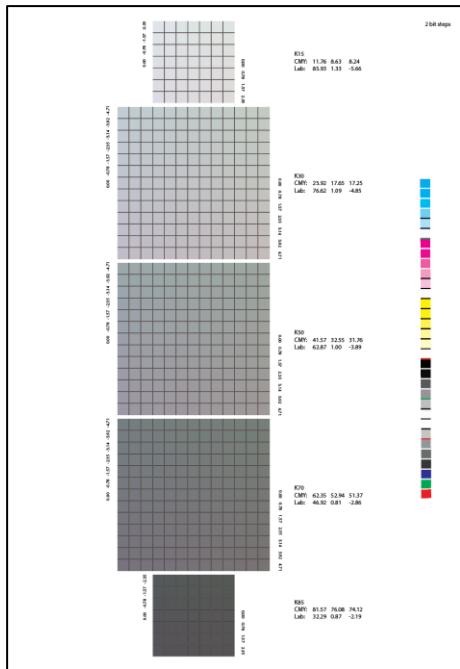
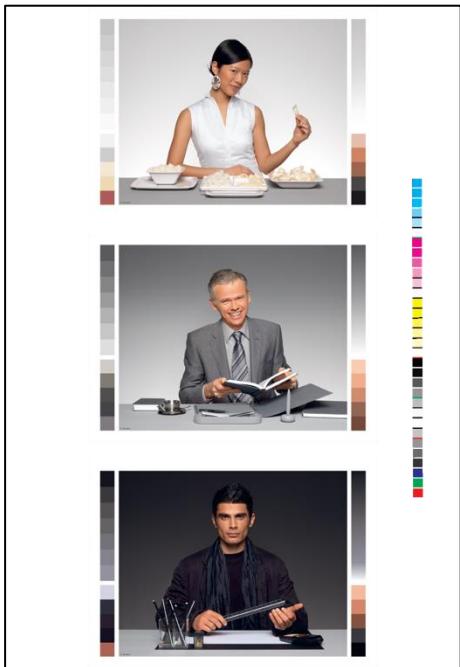


Figura 36 – Forma test pagina 2: pagina di calibrazione della riproduzione dei grigi

La seconda pagina contiene i cinque diagrammi generati dallo script Grey\_Balance\_Extractor.m illustrato nella Figura Figura 34. Una volta misurato con uno spettrofotometro, e una volta calibrati i TVI, permette di mettere a punto la riproduzione dei grigi.



Due versioni di tre immagini delle Roman16 (Roman16 BVDM Reference Images, s.d.) vengono utilizzate per valutare visivamente la riproduzione dei grigi.

Tutte le immagini sono state separate in file TIFF CMYK a 8 bit utilizzando una caratterizzazione FOGRA51 standard (profilo ICC PSOCoated\_v3) utilizzando l'intento di rendering percettivo dalle immagini RGB originali a 16 bit, per simulare un processo professionale reprografico standard.

Le prime tre immagini contengono grigi quasi neutri nelle luci, nei toni medi e nei toni scuri. Il secondo set è composto dalle stesse immagini fornite in bianco e nero puro RGB: quando convertito in CMYK la riproduzione in grigio si ottiene solo se il bilanciamento C, M, Y e K è perfetto.

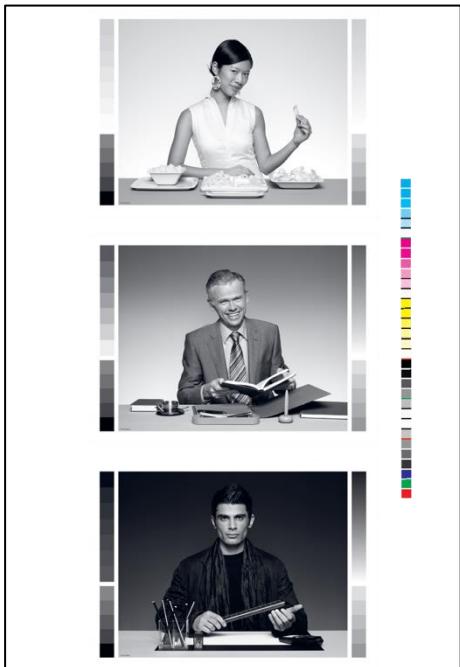


Figura 37 – Forma test pagine 3,4: Immagini Roman 16 Per la valutazione visiva dei grigi



Figura 38 – Forma test pagine 5,6,7: immagini Roman 16 per valutazione visiva generica

Le ultime pagine contengono un sottoinsieme di altre immagini Roman16 (Roman16 BVDM Reference Images, s.d.) per convalidare visivamente gli effetti delle fasi di calibrazione TVI e del bilanciamento del grigio. Non rientra nell'ambito del processo descritto ottenere la coerenza cromatica in tutte le aree di colore.

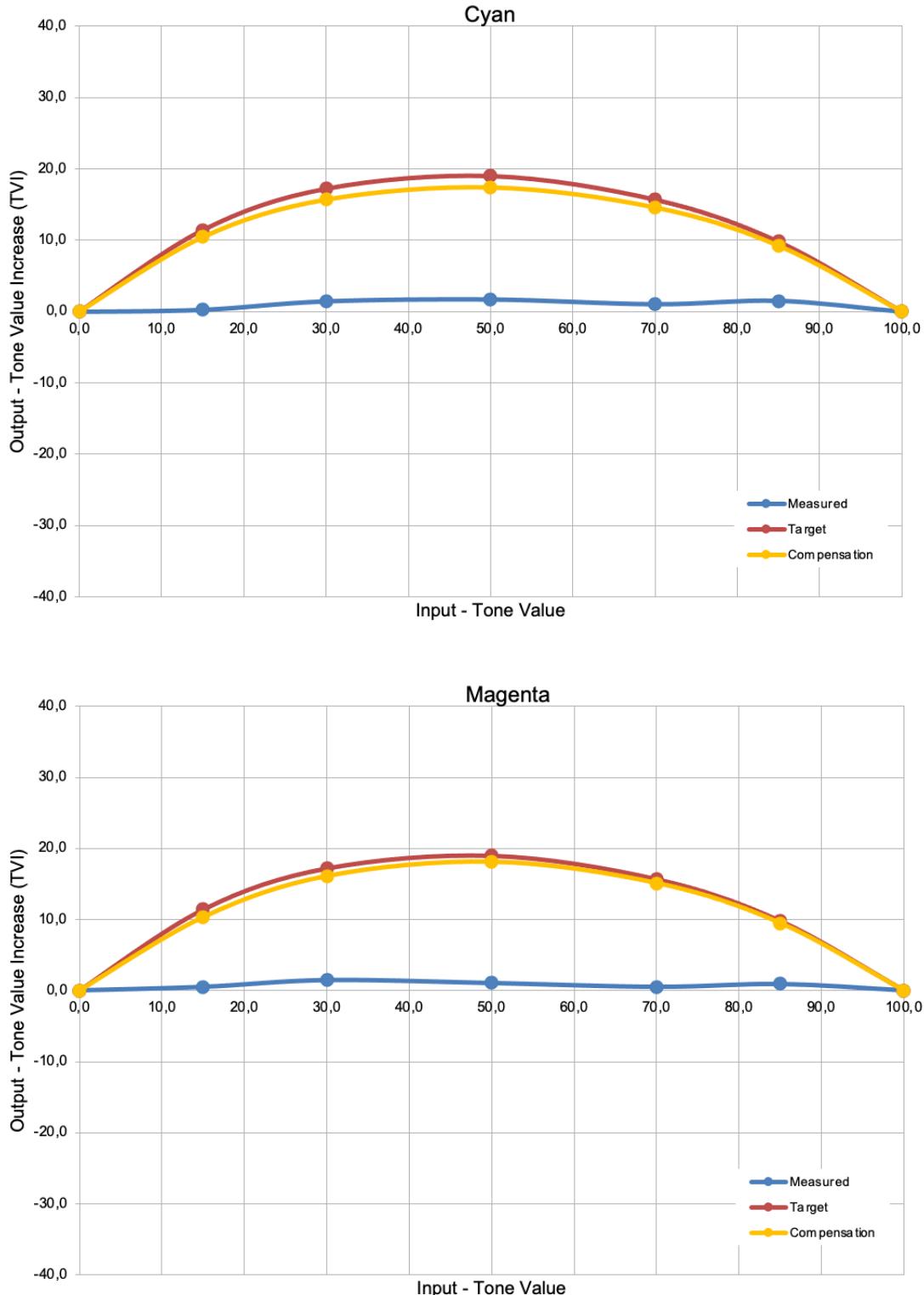
### 3.3.2. Calibrazione TVI

Seguendo il processo descritto nella sezione 2.11 di cui sopra, il processo viene prima calibrato secondo la norma ISO 12647-2:2013 TVI curva A (vedere Figura 2.11 più sopraFigura 31), a partire da una stampa LUT lineare. Questo passaggio è la precondizione sia per avere il miglior contrasto dinamico che per concordare con la calibrazione FOGRA51. Dal punto di vista della riproduzione grigia, sotto certi limiti ogni calibrazione del tono si adatta bene come punto di partenza.

La calibrazione TVI viene effettuata con una regressione lineare effettuata da un file Excel: il processo è abbastanza banale e i dettagli sono fuori dallo scopo del documento corrente. Il risultato è una LUT (look-up table) CMYK che deve essere caricata nel flusso di lavoro della stampante e che verrà applicata a tutte le ulteriori tirature.

Si prega di notare che la riproduzione originale delle curve TVI lineari era molto vicina al risultato desiderato e probabilmente tutto il processo avrebbe funzionato bene anche senza questo passaggio.

## Ottimizzazione della riproduzione dei grigi nei processi di stampa CMYK



## Ottimizzazione della riproduzione dei grigi nei processi di stampa CMYK

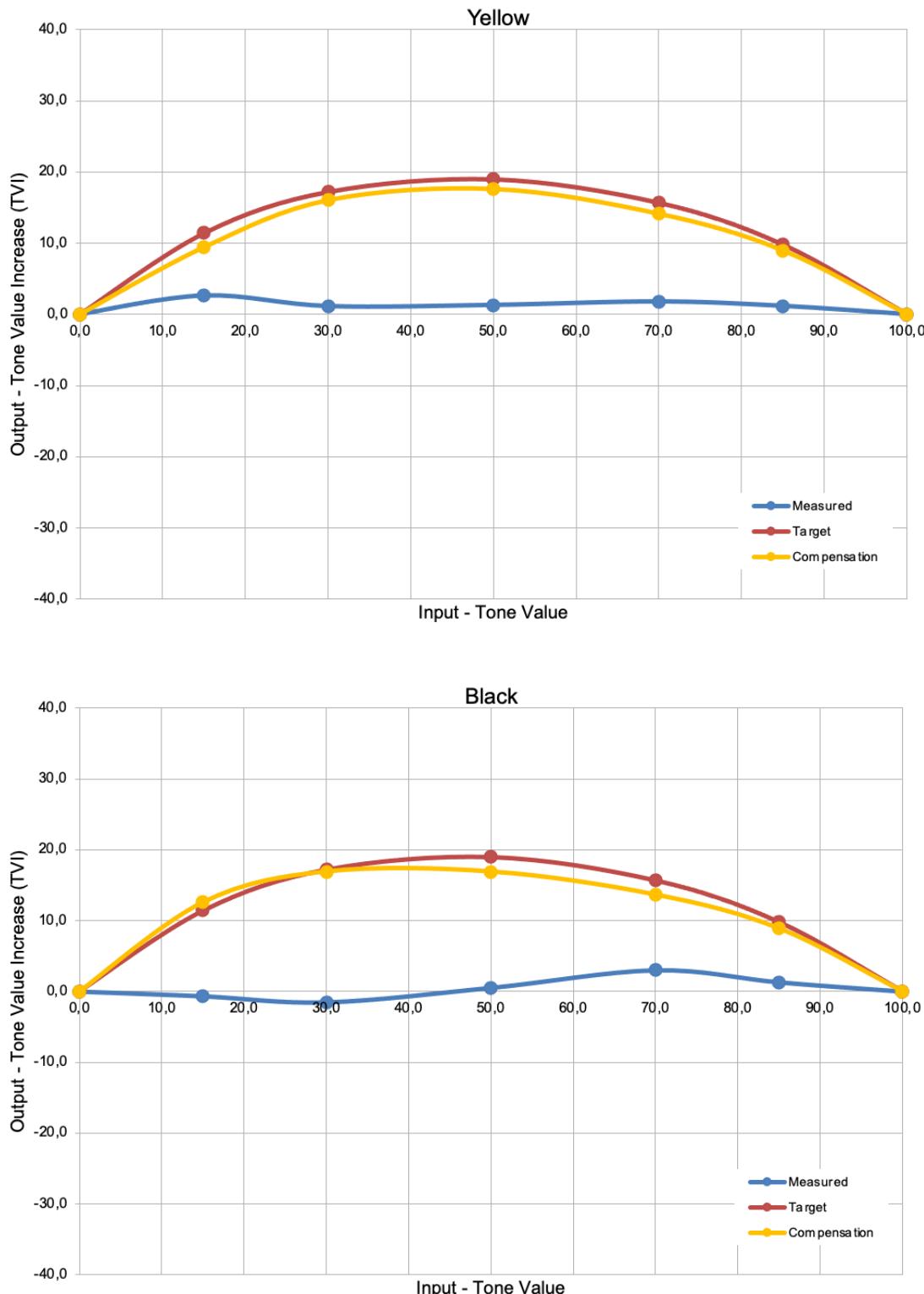


Figura 39 - TVI misurato e curva di correzione calcolata da una condizione lineare.

## Ottimizzazione della riproduzione dei grigi nei processi di stampa CMYK

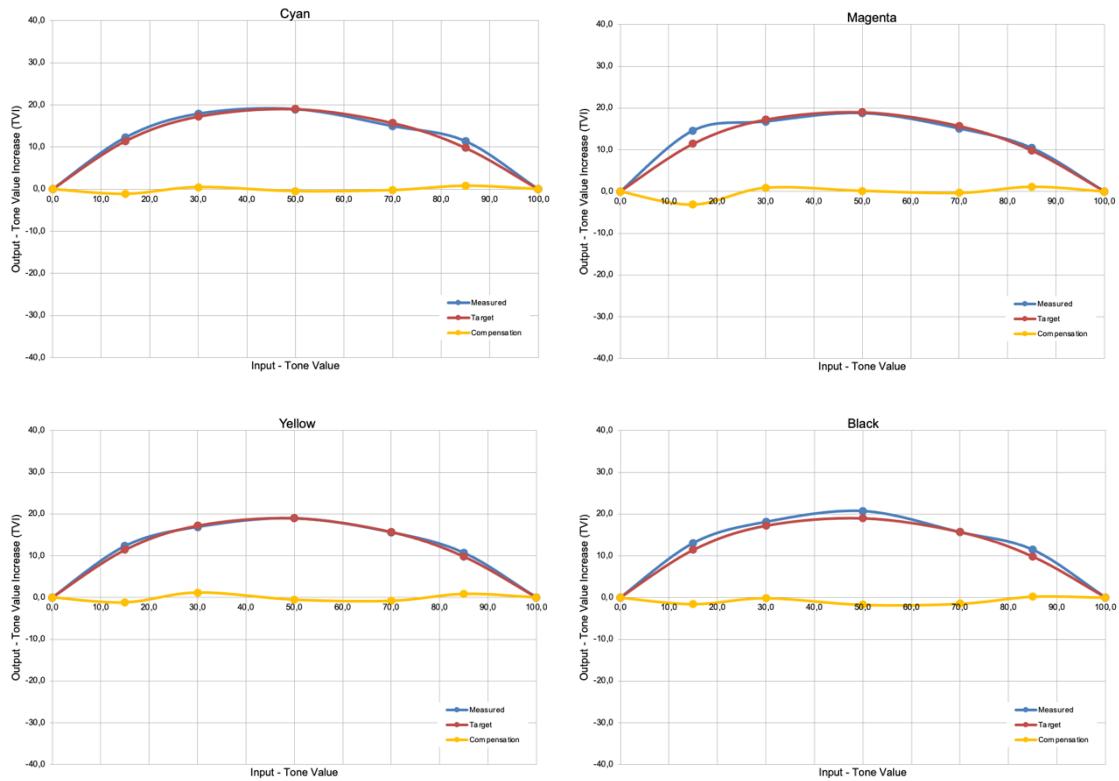


Figura 40 - TVI misurato per verificare la condizione corretta, con correzione residua da applicare.  
L'ulteriore correzione non è stata applicata perché all'interno della variabilità del sistema.

### 3.3.3. Messa a punto della riproduzione dei grigi

Una volta che il sistema di stampa è calibrato secondo le TVI, è pronto per essere messo a punto per la riproduzione dei grigi.

Il processo è codificato nello script MATLAB Grey\_Finder mlx il cui diagramma di flusso è mostrato nella Figura Figura 41.

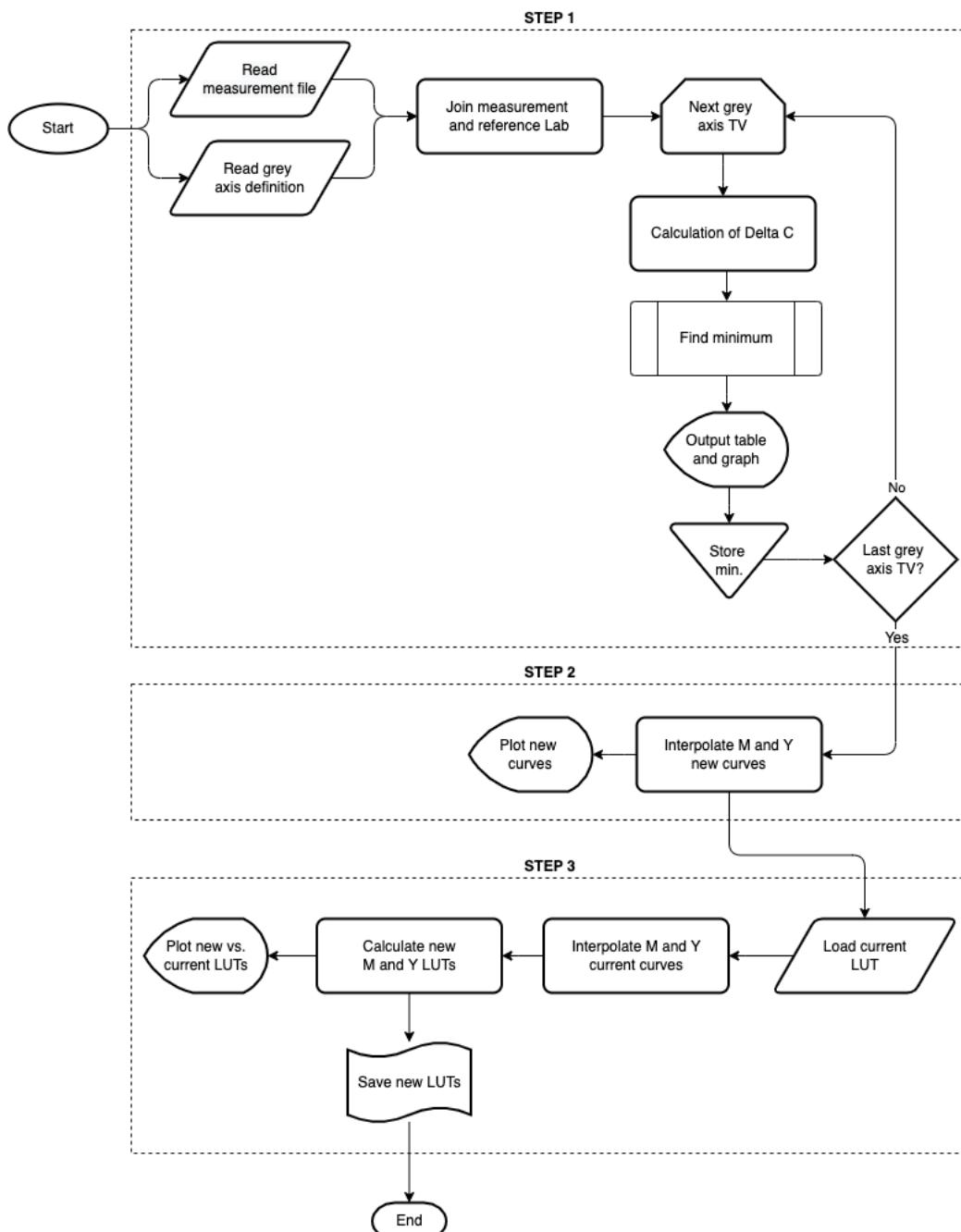


Figura 41 - Diagramma di flusso dello script MATLAB Grey\_Finder mlx

Lo script accetta come input:

- Misurazioni CIELAB della seconda pagina del modulo di prova, combinate con i valori dell'asse dei grigi calcolati nella sezione 3.1 precedente più sopra
- Current LUT.xlsx: LUT CMYK attuale calcolata durante la taratura TVI del punto 3.3.2**Error! Reference source not found.**

Lo script fornisce in output:

- Diversi grafici per valutare i calcoli
- Calibrated LUT.xlsx: Contiene le LUT M e Y ricalcolate che dovrebbero fornire la riproduzione dei grigi desiderata

Le fasi della messa a punto sono:

1. Trovare i 5 punti neutri mantenendo C fisso e spostando solo M e Y
2. Calcolare le curve di correzione M e Y nell'intero intervallo di toni utilizzando un'interpolazione spline
3. Calcola delle nuove LUT M e Y applicando la correzione alle LUT calibrate TVI

## PASSO 1: Trovare i punti neutri

Per comprendere questo passaggio, è importante analizzare come viene eseguito il grafico della Figura Figura 42 . Cinque diagrammi vengono generati automaticamente dallo script come descritto nella Figura Figura 34, scelti come punti arbitrari nell'intera gamma tonale. Come procedura consigliata, i campioni 15, 30, 50, 70 e 85 vengono scelti dalla Tabella L'asse grigio risultante è mostrato nella tabella **Error! Not a valid bookmark self-reference.**, dove la colonna TV si riferisce all'equivalente TV del canale K, in percentuale.

Tabella 5. Ognuno di questi diagrammi, di dimensione 7x7 o 13x13 patch, contiene una patch centrale che rappresenta la combinazione CMY identificata: in teoria dovrebbe fornire il valore CIELAB ideale. Intorno a ogni patch, i canali M e Y sono incrementati in un intervallo di +/- 3 passi per il più chiaro e il più scuro, e +/- 5 passi per i toni di gamma media. Ogni passaggio contiene un incremento di 2 bit (0,78% TV).

Poiché il canale C è costante per ogni grafico, il risultato è una variazione di tonalità che va da meno a più magenta in direzione x e meno o più giallo in direzione y. Se la riproduzione dei grigi fosse perfetta, la patch centrale di ogni diagramma corrisponderebbe esattamente ai valori CIELAB calcolati. In pratica questo non accade mai, e la messa a punto viene fatta trovando la patch di ogni grafico che ha il delta più basso con il valore target.

## Ottimizzazione della riproduzione dei grigi nei processi di stampa CMYK

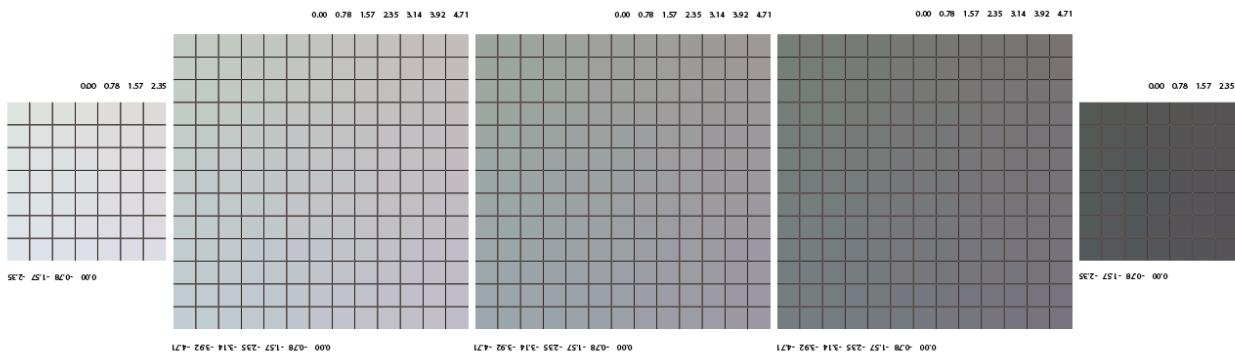


Figura 42 - I cinque diagrammi della riproduzione dei grigi

Per i cinque punti TV il risultato del ritrovamento è un incremento/decremento dei valori M e Y di un valore specifico.

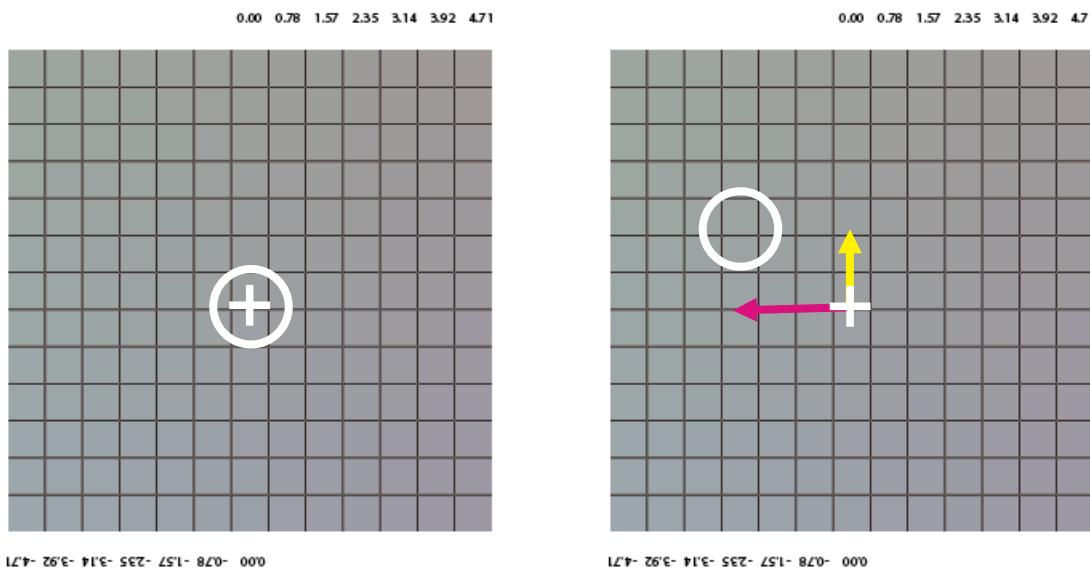


Figura 43 - Esempio di perfetta riproduzione dei grigi - la patch centrale ha il delta inferiore rispetto al valore CIELAB target: non è necessaria alcuna correzione M e Y.

Figura 44 - La patch evidenziata ha il delta inferiore rispetto al CIELAB obiettivo: richiede la correzione M di -2,35 e la correzione Y di +1,57 (esempio simulato)

*NOTA: tale processo è stato originariamente descritto nel metodo G7™ (Hutcheson, 2009, p. 10).*

La tabella risultante del test di calibrazione effettuato, come calcolato dallo script Grey\_Findermlx:

Tabella 7 - Bilanciamento del grigio originale e raffinato

1 C	2 M	3 Y	4 NEW_M	5 NEW_Y
0	0	0	0	0
11.7647	8.6275	8.2353	7.0588	9.0196
23.9216	17.6471	17.2549	16.0784	19.6078
41.5686	32.5490	31.7647	32.5490	32.5490
62.3529	52.9412	51.3725	53.7255	52.1569
81.5686	76.0784	74.1176	76.0784	75.6863
100	100	100	100	100

Le colonne C,M,Y della tabella Tabella 7 sono i punti originali del bilanciamento dei grigi selezionati dalla tabella L'asse grigio risultante è mostrato nella tabella **Error! Not a valid bookmark self-reference.**, dove la colonna TV si riferisce all'equivalente TV del canale K, in percentuale.

Tabella 5, i valori NEW\_M e NEW\_Y rappresentano le modifiche necessarie per mettere a punto il bilanciamento dei grigi al fine di ottenere una buona riproduzione dei grigi. Poiché questo passaggio non comporta interpolazioni, almeno per i cinque punti selezionati il risultato dovrebbe essere esattamente come previsto.

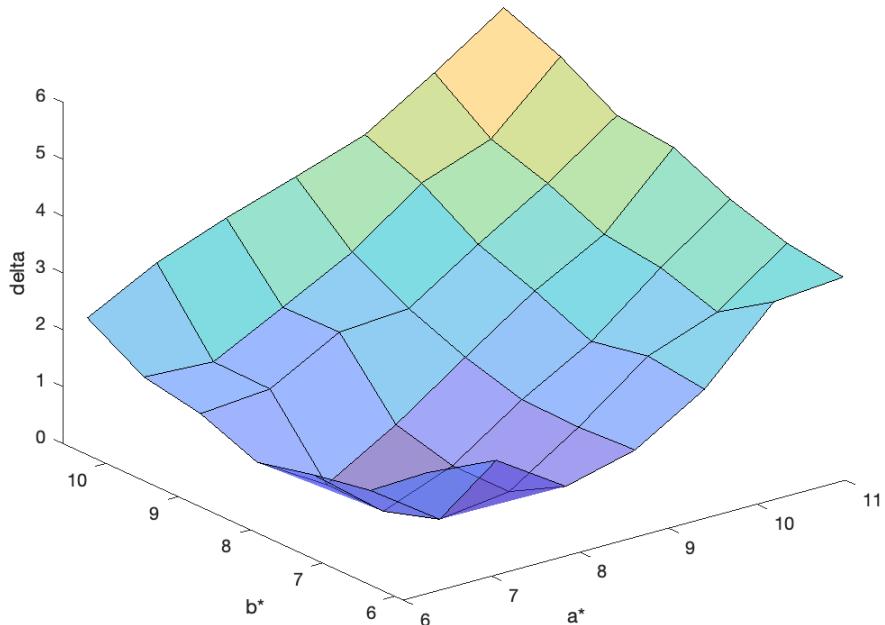
A seguire l'output dei calcoli intermedi degli script:

## Ottimizzazione della riproduzione dei grigi nei processi di stampa CMYK

Find keypoint chart K 15

ctable = 49x8 table

	CMYK_C	CMYK_M	CMYK_Y	CMYK_K	LAB_L	LAB_A	LAB_B	...
1	11.7600	6.2700	5.8800	0	86.5000	1.3300	-7.7600	
2	11.7600	7.0600	5.8800	0	85.9500	1.8000	-8.3600	
3	11.7600	7.8400	5.8800	0	85.5800	2.5100	-8.6300	
4	11.7600	8.6300	5.8800	0	84.9700	3.1900	-8.7300	
5	11.7600	9.4100	5.8800	0	84.5500	3.8200	-8.7900	
6	11.7600	10.2000	5.8800	0	84.1800	4.7100	-9.0100	
7	11.7600	10.9800	5.8800	0	83.7400	5.6400	-9.1900	
8	11.7600	6.2700	6.6700	0	86.2300	0.9100	-7.1200	
9	11.7600	7.0600	6.6700	0	85.7100	1.6500	-7.0800	
10	11.7600	7.8400	6.6700	0	84.8800	2.2700	-7.5200	
11	11.7600	8.6300	6.6700	0	84.0900	3.1000	-7.7300	
12	11.7600	9.4100	6.6700	0	83.7300	4.0600	-8.0200	
13	11.7600	10.2000	6.6700	0	83.0400	4.5400	-8.1300	
14	11.7600	10.9800	6.6700	0	82.6200	5.5200	-8.6900	
...								
...								



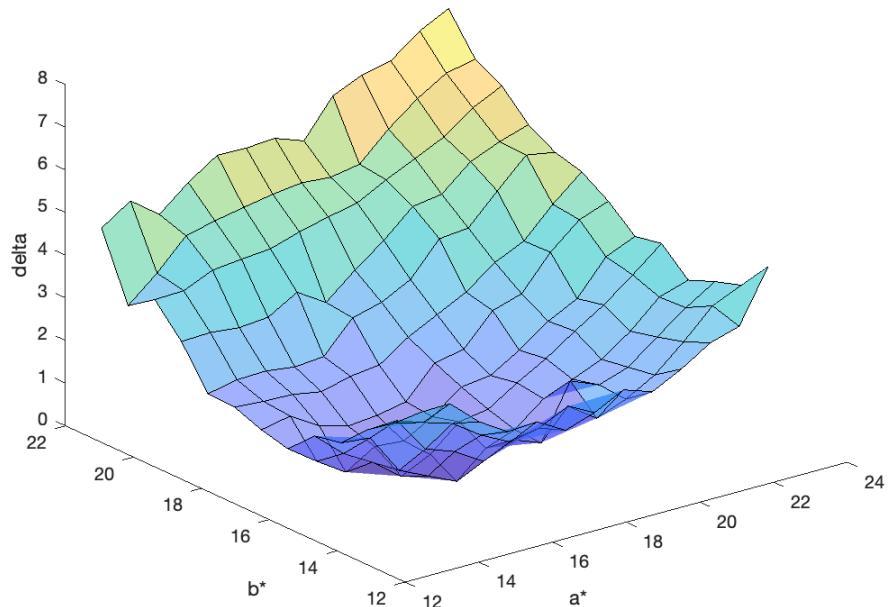
C=11.76 M=7.06 Y=9.02 delta=0.20

## Ottimizzazione della riproduzione dei grigi nei processi di stampa CMYK

Find keypoint chart K 30

c

	CMYK_C	CMYK_M	CMYK_Y	CMYK_K	LAB_L	LAB_A	LAB_B	...
1	23.9200	12.9400	12.5500	0	76.8400	0.1900	-9.1900	
2	23.9200	13.7300	12.5500	0	76.1000	0.8300	-9.7300	
3	23.9200	14.5100	12.5500	0	75.6200	1.2800	-9.2300	
4	23.9200	15.2900	12.5500	0	75.5100	1.6400	-9.7700	
5	23.9200	16.0800	12.5500	0	74.9100	2.3700	-10.1000	
6	23.9200	16.8600	12.5500	0	74.7800	2.4700	-10.0600	
7	23.9200	17.6500	12.5500	0	74.2800	2.7300	-10.0300	
8	23.9200	18.4300	12.5500	0	74.4800	3.2500	-9.5700	
9	23.9200	19.2200	12.5500	0	73.7200	4.1200	-10.1000	
10	23.9200	20.0000	12.5500	0	73.3400	4.3600	-10.3100	
11	23.9200	20.7800	12.5500	0	73.1200	4.9300	-10.1100	
12	23.9200	21.5700	12.5500	0	72.6300	5.4100	-10.4000	
13	23.9200	22.3500	12.5500	0	72.2800	5.5500	-10.7200	
14	23.9200	12.9400	13.3300	0	78.1900	0.8500	-7.7400	
...								



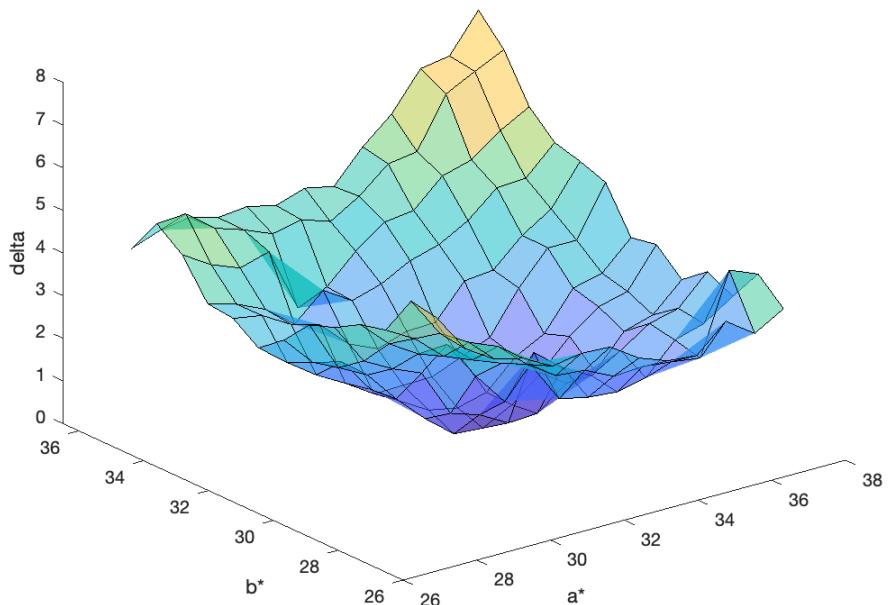
C=23.92 M=16.08 Y=19.61 delta=0.34

## Ottimizzazione della riproduzione dei grigi nei processi di stampa CMYK

Find keypoint chart K 50

c

	CMYK_C	CMYK_M	CMYK_Y	CMYK_K	LAB_L	LAB_A	LAB_B	...
1	41.5700	27.8400	27.0600	0	66.3600	-0.8100	-7.0900	
2	41.5700	28.6300	27.0600	0	65.7700	-0.1200	-7.6500	
3	41.5700	29.4100	27.0600	0	65.5900	0.5800	-7.9100	
4	41.5700	30.2000	27.0600	0	65.1500	0.5600	-7.7200	
5	41.5700	30.9800	27.0600	0	65.0500	1.2600	-7.8100	
6	41.5700	31.7600	27.0600	0	64.7500	1.5400	-7.6200	
7	41.5700	32.5500	27.0600	0	64.2600	2.0200	-7.7500	
8	41.5700	33.3300	27.0600	0	63.5900	2.6000	-7.3900	
9	41.5700	34.1200	27.0600	0	62.9300	2.8400	-8.1000	
10	41.5700	34.9000	27.0600	0	61.9400	3.6200	-8.3600	
11	41.5700	35.6900	27.0600	0	61.5300	4.4400	-8.8800	
12	41.5700	36.4700	27.0600	0	61.2200	4.7000	-8.8300	
13	41.5700	37.2500	27.0600	0	60.9700	5.4100	-9.4100	
14	41.5700	27.8400	27.8400	0	64.4000	-1.5100	-7.6700	
...								



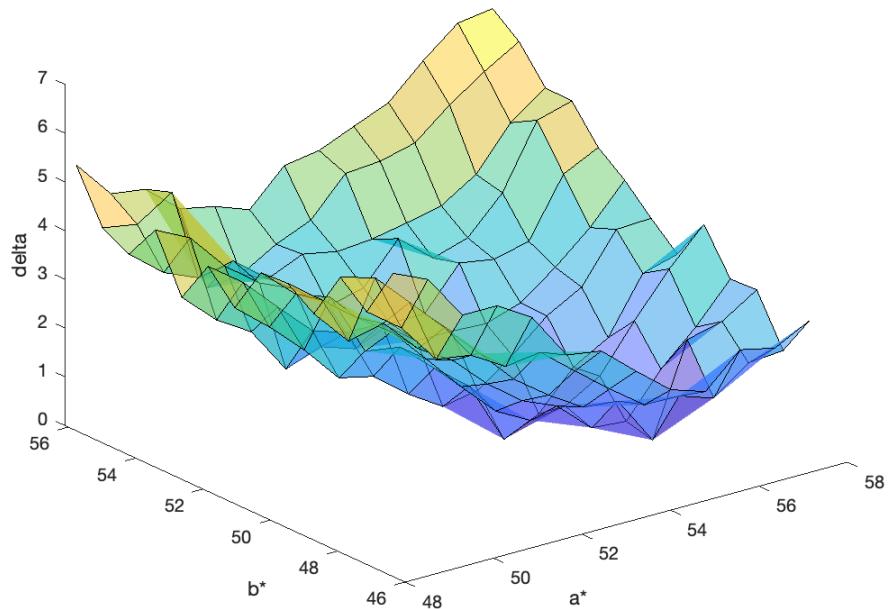
C=41.57 M=32.55 Y=32.55 delta=0.29

## Ottimizzazione della riproduzione dei grigi nei processi di stampa CMYK

Find keypoint chart K 70

c

	CMYK_C	CMYK_M	CMYK_Y	CMYK_K	LAB_L	LAB_A	LAB_B	...
1	62.3500	48.2400	46.6700	0	49.0200	-3.6100	-5.7800	
2	62.3500	49.0200	46.6700	0	49.4200	-2.1300	-6.2800	
3	62.3500	49.8000	46.6700	0	48.9100	-2.0900	-6.1800	
4	62.3500	50.5900	46.6700	0	48.4800	-0.9000	-6.2700	
5	62.3500	51.3700	46.6700	0	47.8200	-0.2900	-6.3600	
6	62.3500	52.1600	46.6700	0	47.5600	0.5300	-6.2600	
7	62.3500	52.9400	46.6700	0	46.9200	1.4100	-6.9400	
8	62.3500	53.7300	46.6700	0	46.6700	1.5200	-7.0400	
9	62.3500	54.5100	46.6700	0	46.5600	1.4900	-7.3500	
10	62.3500	55.2900	46.6700	0	46.0100	1.8600	-7.5800	
11	62.3500	56.0800	46.6700	0	46.0600	2.8000	-7.9900	
12	62.3500	56.8600	46.6700	0	45.4900	4.1400	-7.9500	
13	62.3500	57.6500	46.6700	0	45.3000	4.0500	-8.1300	
14	62.3500	48.2400	47.4500	0	48.7500	-2.9600	-4.8300	
...								



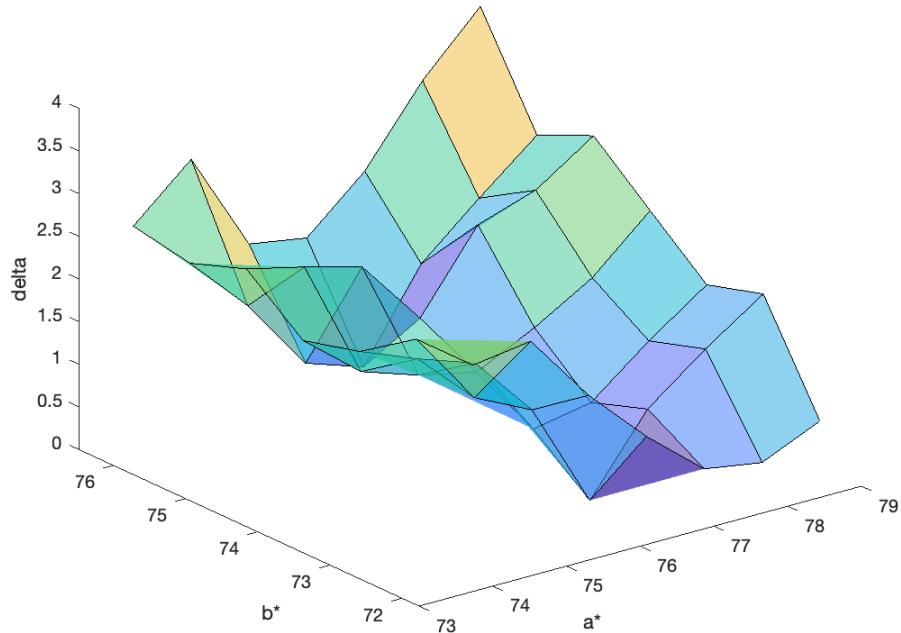
C=62.35 M=53.73 Y=52.16 delta=0.06

## Ottimizzazione della riproduzione dei grigi nei processi di stampa CMYK

Find keypoint chart K 85

ctable = 49x8 table

	CMYK_C	CMYK_M	CMYK_Y	CMYK_K	LAB_L	LAB_A	LAB_B	...
1	81.5700	73.7300	71.7600	0	32.5300	-1.2900	-3.3500	
2	81.5700	74.5100	71.7600	0	32.4700	-1.1000	-4.5200	
3	81.5700	75.2900	71.7600	0	33.5800	-0.1700	-3.7500	
4	81.5700	76.0800	71.7600	0	33.2900	1.0700	-3.9400	
5	81.5700	76.8600	71.7600	0	32.6900	1.8000	-4.3600	
6	81.5700	77.6500	71.7600	0	32.3500	2.6300	-4.9100	
7	81.5700	78.4300	71.7600	0	32.0600	3.2400	-5.3200	
8	81.5700	73.7300	72.5500	0	34.0800	-1.1000	-3.4200	
9	81.5700	74.5100	72.5500	0	33.8500	-0.3900	-3.2400	
10	81.5700	75.2900	72.5500	0	33.4400	0.2300	-2.6400	
11	81.5700	76.0800	72.5500	0	32.9900	1.1100	-2.6900	
12	81.5700	76.8600	72.5500	0	32.3300	1.8500	-3.4300	
13	81.5700	77.6500	72.5500	0	31.4000	2.3300	-3.7900	
14	81.5700	78.4300	72.5500	0	31.2600	2.8100	-4.1000	
...								
...								



C=81.57 M=76.08 Y=75.69 delta=0.21

## PASSO 2: Calcolare le curve di correzione

Le correzioni calcolate nella fase 1 non sono di pratico utilizzo: la LUT originale calcolata per la calibrazione TVI nel punto 3.3.2 dovrebbe essere modificata, ad esempio, da  $M = 17,6741\%$  a  $M = 16,0784\%$ . Ma la LUT calibrata era stata introdotta nel flusso di lavoro solo in passi del 5% e questi punti pivot non sono disponibili. Per questo motivo, le LUT M e Y devono essere ricalcolate nello stesso intervallo delle LUT calibrate TVI, per consentire una facile modifica del software del flusso di lavoro. **Error! Reference source not found.**

Per fare ciò, partendo dai cinque punti noti, vengono interpolate nuove curve di correzione per M e Y. Il metodo utilizzato è l'interpolazione spline, che consente alla curva di passare esattamente per i punti noti.

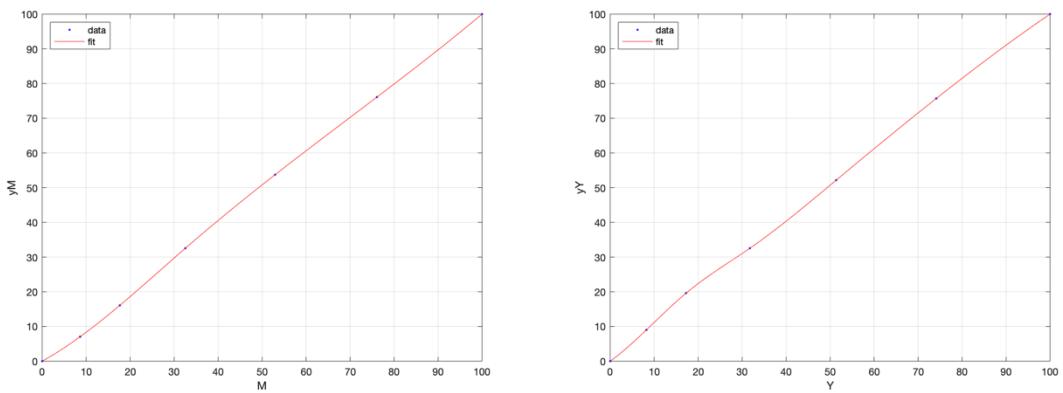


Figura 45 - Riproduzione dei grigi migliorati nel passo 2: correzione curve interpolate per M (sinistra) e Y (destra)

Il  $R^2$  di questa interpolazione è 1,0 dato il metodo spline *piecewise* utilizzato.

## PASSO 3: Calcolare le LUT calibrate

Lo stesso metodo di interpolazione viene applicato alle LUT originali e ora che tutte le LUT possono essere espresse da funzioni, il passo successivo può essere matematicamente descritto come:

$$M_{new} = M_{LUT}(M_{corr}(TV)), \quad Y_{new} = Y_{LUT}(Y_{corr}(TV))$$

dove:

*TV* è l'intervallo tonale originale [0 – 100] in step di 5,

$M_{corr}, Y_{corr}$  sono le curve di correzione della Figura 45,

$M_{LUT}, Y_{LUT}$  sono le LUT attuali dopo la calibrazione TVI,

$M_{new}, Y_{new}$  sono le nuove LUT calibrate

Il risultato del processo può essere visto sia nella Figura Figura 46 che nella Tabella Tabella 8 di seguito, si prega di notare che la LUT del ciano non è cambiata:

## Ottimizzazione della riproduzione dei grigi nei processi di stampa CMYK

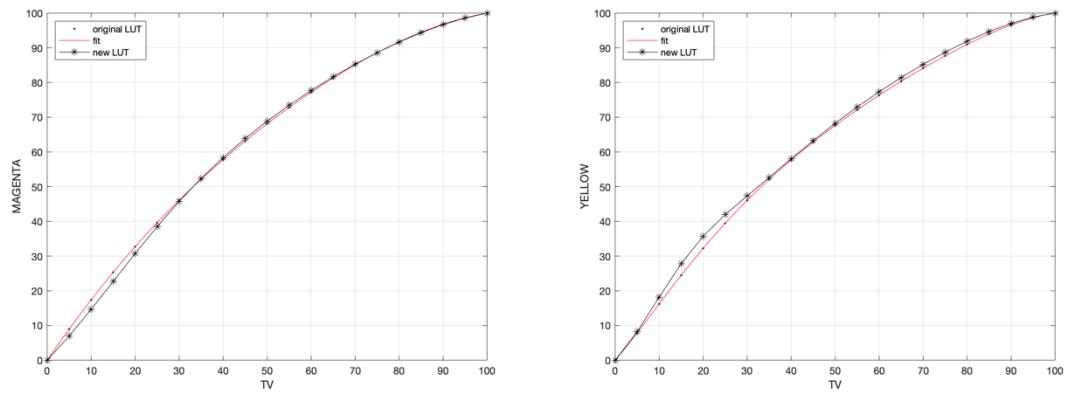


Figura 46 - Grafici delle LUT M e Y calibrati

Tabella 8 - LUT M e Y calibrate

TV	LUT_C	LUT_M	LUT_Y	LUT_K	NEW_LUT_M	NEW_LUT_Y
0	0	0	0	0	0	0
5	9.2140	8.9469	7.8531	10.5031	6.9580	8.1865
10	17.6699	17.3944	16.2137	19.5926	14.6495	18.1539
15	25.4693	25.3140	24.4401	27.5614	22.6820	27.8059
20	32.6984	32.7140	32.2183	34.6473	30.7148	35.6962
25	39.4304	39.6224	39.4244	41.0408	38.4710	41.9020
30	45.7271	46.0764	46.0402	46.8928	45.7371	47.3264
35	51.6400	52.1152	52.1023	52.3217	52.3738	52.6625
40	57.2108	57.7759	57.6723	57.4189	58.3798	58.0287
45	62.4721	63.0906	62.8188	62.2533	63.8477	63.2645
50	67.4472	68.0850	67.6078	66.8744	68.8546	68.2593
55	72.1504	72.7771	72.0963	71.3141	73.4599	72.9454
60	76.5866	77.1765	76.3284	75.5880	77.7100	77.3254
65	80.7512	81.2840	80.3327	79.6954	81.6397	81.4207
70	84.6302	85.0908	84.1194	83.6191	85.2697	85.2332
75	88.1994	88.5787	87.6784	87.3250	88.6061	88.7438
80	91.4250	91.7195	90.9773	90.7619	91.6399	91.9159
85	94.2628	94.4746	93.9601	93.8606	94.3447	94.6961
90	96.6589	96.7956	96.5476	96.5357	96.6745	97.0310
95	98.5496	98.6240	98.6396	98.6863	98.5555	98.8472
100	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000

### 3.4. Valutazione della riproduzione dei grigi

La valutazione della riproduzione dei grigi viene effettuata dallo script MATLAB Grey\_Evaluation.mlx, il cui diagramma di flusso è mostrato in Figura 47:

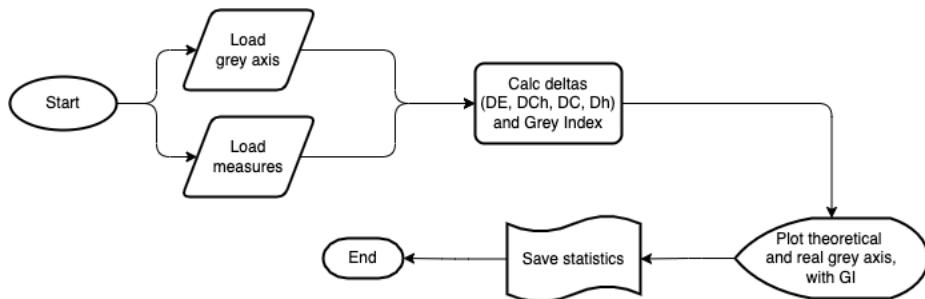


Figura 47- Diagramma di flusso dello script MATLAB Grey\_Evaluation.mlx

Misurando il diagramma della Figura Figura 42, dopo la stampa effettuata utilizzando le LUT di calibrazione della Tabella Tabella 8, vengono estratte le cinque patch centrali e viene costruito il nuovo asse dei grigi calibrato. Il grafico viene confrontato con l'asse grigio FOGRA51 originale calcolato nella Tabella L'asse grigio risultante è mostrato nella tabella **Error! Not a valid bookmark self-reference.**, dove la colonna TV si riferisce all'equivalente TV del canale K, in percentuale.

Tabella 5.

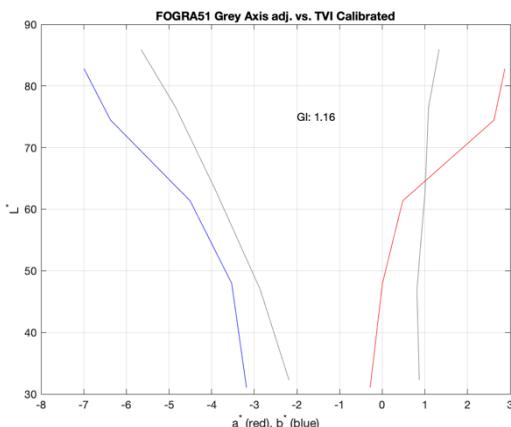


Figura 48 - Asse grigio misurato dopo la calibrazione TVI (sezione 3.3.2)**Error! Reference source not found.**

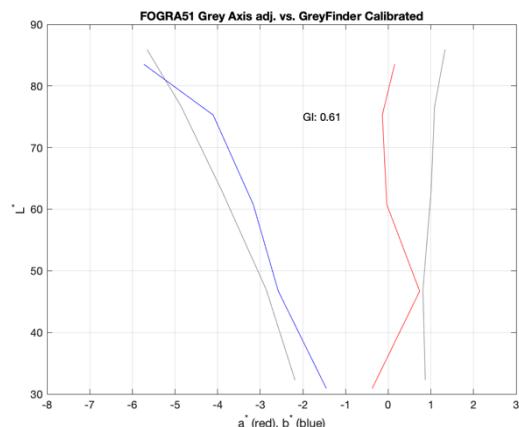


Figura 49 - Asse del grigio misurato dopo l'ottimizzazione del bilanciamento dei grigi (sezione 3.3.3 PASSO 3)**Error! Reference source not found.**

L'asse dei grigi mostrato nella Figura Figura 49 ha i valori della tabella seguente:

Tabella 9 - Riproduzione e statistiche dei grigi calibrati

TV	C	M	Y	Ref. L*	Ref. a*	Ref. b*	Meas. L*	Meas. a*	Meas. b*	$\Delta E_{00}$	$\Delta Ch$
15	11,76	8,63	8,24	85,93	1,33	-5,66	83,52	0,15	-5,73	2,32	1,19
30	23,92	17,65	17,25	76,62	1,09	-4,85	75,29	-0,14	-4,10	2,08	1,43

<b>50</b>	41,57	32,55	31,76	62,87	1,00	-3,89	60,74	-0,03	-3,16	2,43	1,27
<b>70</b>	62,35	52,94	51,37	46,92	0,81	-2,86	46,70	0,74	-2,58	0,34	0,29
<b>85</b>	81,57	76,08	74,12	32,29	0,87	-2,19	30,92	-0,38	-1,45	2,21	1,44

### 3.4.1. Grey Index

Un tentativo di riassumere una deviazione dell'asse dei grigi è stato proposto dall'autore nella conferenza CIC27 affrontando un caso d'uso diverso: quando un profilo ICC viene verificato rispetto all'asse grigio a \* = b \* = 0 (Biswas, Beltrami, & Saez, 2019). La premessa rimane valida anche sul caso d'uso corrente, quando i risultati di stampa devono essere confrontati con un asse grigio obiettivo. Come riportato nel documento, "*Ci sono due diverse deviazioni di neutralità grigia (una in crominanza e l'altra in angolo di tonalità) che possiamo osservare e, per semplificare il processo di valutazione, abbiamo creato un unico indice che può combinare insieme queste deviazioni*". Gli standard attuali forniscono diverse formule per valutare la distanza di un punto dell'asse rispetto a un riferimento, come la differenza cromatica CIE (DCh), ma non esiste un modo standardizzato per riassumere tali distanze con una singola metrica.

La formula dell'indice di grigio proposta permette di catturare sia la deviazione media costante nella crominanza, sia la variazione delle differenze di tonalità. Queste variazioni di tonalità in diversi punti dell'asse dei grigi possono creare un effetto arcobaleno indesiderato, quando la mancanza di neutralità si estende in diverse regioni del piano cromatico a\* b\* (rosso, giallo, verde, blu) attraverso l'asse. GI è zero quando l'asse grigio corrisponde perfettamente all'asse target nel piano cromatico, ignorando le differenze di chiarezza.

Una possibile tolleranza per valutare la neutralità del grigio è considerare  $GI \leq 1$ .

Un'ipotesi è che quando la deviazione è costante, se non ci sono altri riferimenti visivi nel nostro campo visivo, di solito il nostro sistema di visione si adatta alla tonalità dominante e il risultato è percepito come neutro. Quando una variazione arcobaleno è presente, con o senza riferimenti neutri nel campo visivo, il nostro sistema visivo non è in grado di adattarsi, e il risultato è particolarmente fastidioso.

*NOTA: Non ho trovato studi o ricerche a sostegno di questa ipotesi: sarà oggetto di esperimenti futuri.*



Figura 50 - Immagini neutre (a sinistra) rispetto alla deviazione verdastra simulata (al centro) e all'effetto arcobaleno simulato di variazione della tonalità (a destra)

Equazione 15 – Equazione del Grey Index - da (Biswas, Beltrami, & Saez, 2019) corretto con l'uso del valore assoluto delle differenze di crominanza, non presente nella formula originale perché  $\Delta C_{ab}^*$  era sempre positivo nel caso d'uso considerato.

$$GI = \frac{abs(\Delta C_{ab}^*)}{\sigma(\Delta h_{ab})} \cdot \left[ \frac{\sigma(\Delta h_{ab})}{2\pi} + 1 \right]$$

dove

$abs(\Delta C_{ab}^*)$  è la media dei valori assoluti delle differenze in croma,

$\sigma(\Delta h_{ab})$  è la deviazione standard delle differenze degli angoli di tinta, in radianti

Tabella 10 - Evoluzione del GI durante le fasi di calibrazione

	LUT lineare	LUT calibrata TVI	LUT con grigi ottimizzati
GI	2,82	1,16	0,61

Il Grey Index dopo la calibrazione TVI era diventato 1,16 ed è sceso a 0,61 dopo la messa a punto della riproduzione dei grigi. Anche se le condizioni calibrate con le TVI erano abbastanza buone, le LUT ottimizzate hanno fornito una migliore neutralità.

### 3.5. Valutazione visiva

Tre diversi passaggi vengono valutati in base a una condizione di visualizzazione standard ISO 3664:2009 P1: la stampa lineare prima del processo di calibrazione, le stampe calibrate con le TVI e le stampe con grigi ottimizzati.



Figura 51 - Valutazione visiva delle tonalità di grigio: stampa lineare (a sinistra), immagini calibrate TVI (al centro), immagini grigie ottimizzate (a destra)

Con la premessa che non è facile scattare una foto che rappresenti colorimetricamente la percezione di un materiale stampato visto in una condizione di illuminazione standardizzata, Figura 5151:

- La stampa lineare non calibrata (a sinistra) è troppo chiara. Ciò è coerente con le TVI molto basse (quasi 0) misurate all'inizio del processo e mostrate nella Figura Figura 39. Ad ogni modo, lo spostamento del colore di riproduzione iniziale dei grigi non era completamente sbagliato, rispetto ad altri sistemi di stampa, e presentava una leggera tonalità verdastra.
- La stampa calibrata con le TVI (al centro) ha il giusto contrasto tra mezzi toni, luci e ombre: è una prova che è stata applicata la LUT di correzione desiderata. L'equilibrio dei grigi è abbastanza buono soprattutto nelle aree scure, ma ha una sfumatura rossastra nelle luci. La percezione visiva concorda con il calcolo della riproduzione dei grigi mostrato nella Figura Figura 48.
- La stampa con i grigi calibrati (a destra) ha una migliore neutralità. Non ci sono sfumature visibili e l'insieme delle tre foto sembra omogeneo. Ciò concorda con il calcolo della riproduzione dei grigi mostrato nella Figura Figura 49e con il miglioramento del Grey Index osservato nella sezione 3.4.1 precedente3.4.1 più sopra.



Figura 52 - Valutazione visiva dei colori pastello: stampa lineare (a sinistra), immagini calibrate TVI (al centro), immagini grigie ottimizzate (a destra)

Analizzando altri colori, si può vedere che c'è una grande differenza dalla stampa lineare alle altre condizioni, ma solamente cambiamenti marginali dovuti alla messa a punto dei grigi rispetto alle immagini calibrate TVI. Anche se i cambiamenti delle LUT hanno interessato tutti i toni medi di tutti i colori, man mano che i colori diventano più saturi il nostro sistema di visione perde la capacità di percepire le differenze introdotte.

## 4. Conclusioni e lavoro futuro

### 4.1. Conclusioni

Il processo testato ha dimostrato di funzionare con successo quando la condizione di partenza, dopo la calibrazione TVI, è quasi neutra ed è adatta a essere ottimizzata. Probabilmente se il punto di partenza fosse stato quello troppo vicino all'obiettivo, il processo di messa a punto della riproduzione dei grigi sarebbe stato meno efficace e avrebbe introdotto più rumore che segnale, presentando una sovra-correzione. Al contrario, se il punto di partenza fosse stato troppo lontano, sarebbe stato necessario un flusso di lavoro di calibrazione in 4 o 5 fasi meno efficiente.

I punti di forza del metodo sono:

- Può essere completamente automatizzato poiché si basa solo su misurazioni e algoritmi del colore.
- Avere una robusta definizione dei grigi consente un controllo specifico del processo durante la produzione.
- Il Grey Index può essere utilizzato come metrica per identificare l'efficacia della messa a punto della riproduzione dei grigi.
- In un numero significativo di flussi di lavoro e casi d'uso, il metodo proposto consente di stampare immagini CMYK digitali già preparate per la condizione standard FOGRA51 senza utilizzare una conversione di colore ICC. Il risultato sarà percettivamente coerente nell'asse grigio e in tutti i colori tenui; i colori più saturi avranno deviazioni a seconda delle differenze primarie e secondarie CMYK rispetto alla caratterizzazione selezionata.

I punti deboli sono principalmente legati all'implementazione pratica del metodo:

- Richiede uno spettrofotometro accurato e ripetibile, possibilmente automatizzato, con una media di almeno 3 letture per identificare e correggere i valori anomali di misurazione. Test precedenti effettuati con uno spettrofotometro manuale portatile e con letture singole non sono riusciti a causa della scarsa precisione di misurazione.
- Nei processi di stampa digitale, quando l'uso di una LUT non è necessario, il metodo aggiunge ulteriori complicazioni rispetto all'uso diretto dei profili ICC. Proprio per questo, il test è stato effettuato su una tecnologia HP Indigo® che utilizza LUT che imitano il tradizionale concetto della lastra litografica offset.
- Il metodo di messa a punto della riproduzione dei grigi non si preoccupa delle deviazioni di chiarezza ( $L^*$ ) introdotte, che in alcuni casi possono portare a un peggioramento del contrasto percepito.

Un altro approccio utilizzato nel settore è quello di calibrare la stampante ignorando la riproduzione neutrale dei grigi e lasciando tutti i calcoli alla flusso di gestione del colore basato sui profili ICC (ICC specifications). L'architettura dei profili ICC tratta i grigi e altre aree di colore senza un focus specifico: è responsabilità del software di profilazione ICC implementare la strategia corretta per affrontarlo. La creazione di un profilo ICC è solitamente un'operazione effettuata in un unico passaggio, senza un reale controllo dei calcoli intermedi: l'utilizzo della tecnologia odierna fornisce un buon risultato in molti casi d'uso, ma l'impossibilità di controllare il risultato in modo fine non lo rende adatto ad applicazioni critiche. Iniziare a impostare un flusso di lavoro con una definizione predeterminata de grigi consente

all'utente di avere tutto sotto controllo e di mettere a punto facilmente il sistema o applicare rigorose tolleranze di controllo del processo.

## 4.2. Lavoro futuro

Ci sono diverse aree di miglioramento nel campo della riproduzione dei grigi nella stampa industriale CMYK, guardando sia all'efficienza che all'efficacia dei processi di calibrazione:

- Potrebbe essere ipotizzabile un processo di calibrazione in una singola fase, utilizzando una strategia simile alle creazioni di tabelle interne dei profili ICC. Sarebbe però da dimostrare il livello di accuratezza che è possibile raggiungere.
- Considerando calibrazioni multiple su diversi substrati di carta dello stesso sistema di stampa, potrebbe essere implementato un sistema di apprendimento automatico (*machine learning*) per prevedere le correzioni da apportare a seconda delle caratteristiche e del colore del substrato.
- La metrica TVI è ancora ampiamente utilizzata nel settore, ma la formula CTV (*Colour Tone Value*) è in fase di standardizzazione. Nell'ambito dell'argomento della riproduzione dei grigi non dovrebbe avere molto impatto, ma saranno comunque necessarie ulteriori valutazioni.
- Le formule di differenza di colore utilizzate per valutare la neutralità dei grigi sono tutte basate sul sistema colorimetrico CIE 1931 (Wyszecki G., 1982, p. 130-176). Diversi approcci come l'adattamento cromatico CAT02 su CIELAB, o RLAB, o CIECAM02 potrebbero essere esplorati. (Fairchild, 2005, p. 301)
- Sono necessari ulteriori lavori per verificare la metrica GI in diverse condizioni e correlarla con la valutazione visiva al fine di definire tolleranze pratiche da utilizzare nei flussi di processo o di controllo qualità. Per fare ciò, è necessario eseguire esperimenti psicofisici per correlare le misure con il colore percepito. (Fairchild, 2005, p. 38-55)

In definitiva, vi è la necessità di più dati ottenuti da diversi substrati di carta e processi di stampa, misurati in condizioni controllate. La complessità del metodo è che il livello di accuratezza necessario cade nello stesso intervallo dell'accuratezza e dell'accordo interstrumentale, o coerenza, degli spettrofotometri più utilizzati: miscelare misure da diversi esperimenti impedisce un confronto diretto tra di loro.

## Bibliografia

1. Ansel Adams. [Online] Wikipedia, 7 9 2021. [Cited: 18 9 2021.]  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Ansel\\_Adams](https://en.wikipedia.org/wiki/Ansel_Adams).
2. BARRETT, T.H. *The Woman Who Discovered Printing*. UK : Yale University Press, 2008. ISBN 978-0-300-12728-7.
3. BISWAS, P., BELTRAMI, A. AND SAEZ, J., *A testing paradigm for quantifying ICC profilers*, Paris : IS&T Society for Imaging Science and Technology, 2019. CIC27 Color and Imaging Conference. Vol. 27, pp. 80-85(6). <https://doi.org/10.2352/issn.2169-2629.2019.27.15>.
4. Characterisation data for relevant printing conditions. [Online] FOGRA. [Cited: 2021 9 18.]  
<https://fogra.org/en/downloads/work-tools/characterisation-data>.
5. eXact™ spectrophotometer. [Online] X-Rite. [Cited: 23 10 2021.]  
<https://www.xrite.com/es/categories/portable-spectrophotometers/exact>.
6. Expert Guide - Color & Quality. Heidelberg : Heidelberger Druckmaschinen AG, 2019.
7. FAIRCHILD, M. D. *Color Appearance Models - 2nd Edition*. s.l. : John Wiley & Sons, 2005. ISBN: 0-470-01216-1 (HB).
8. FD-9 catalog. [Online] [Cited: 23 10 2021.]  
[https://www.konicaminolta.com/instruments/download/catalog/color/pdf/fd9\\_catalog\\_eng.pdf](https://www.konicaminolta.com/instruments/download/catalog/color/pdf/fd9_catalog_eng.pdf).
9. FIRST - Flexographic Image Reproduction Specifications and Tolerances. Minneapolis : FFTA, 2009. FIRST 4.0.
10. HUTCHESON, D. *G7 How To*. s.l. : IDEAlliance, 2009.
11. ICC specifications. [Online] [Cited: 03 01 2021.] [https://www.color.org/icc\\_specs2.xalter](https://www.color.org/icc_specs2.xalter).
12. ILETO, W. C. *Understanding Gray Component Replacement (GCR)*. *Grafika*. 2008, Vol. April.
13. ISO 12637-2:2008 Graphic Technology - Vocabulary - Part 2: Prepress terms. : ISO, 2008. ISO 12637-2.
14. ISO 12647-1:2013 Graphic Technology - Process control for the production of half-tone colour separations, proof and production prints — Part 1: Parameters and measurement methods. : ISO, 2013. ISO 12647-1.
15. ISO 12647-2:2013 Graphic technology — Process control for the production of half-tone colour separations, proof and production prints — Part 2: Offset lithographic processes. : ISO, 2013. ISO 12647-2.
16. ISO/TC130 Graphic Technology. [Online] ISO. [Cited: 24 9 2021.]  
<https://committee.iso.org/home/tc130>.
17. JOHNSON, C., *The practical Zone System.*, 4th Edition, Burlington, MA, USA : Elsevier, 2007.  
ISBN 13: 978-0-240-80756-0.
18. LINDBLOOM, B. *Chromatic Adaptation. Bruce Lindbloom.com*. [Online] 7 4 2017. [Cited: 3 10 2021.] <http://www.brucelindbloom.com>.
19. LUO, M. R. AND CUI, G., RIGG, B. *The Development of CIE 2000 Colour-Difference Formula: CIEDE2000. COLOR research and application*. 2001, Vol. 26, 5.

20. MURRAY, A. *Monochrome Reproduction in Photoengraving*. 6, s.l. : J. Franklin Institute, 1936, Vol. 221. [https://doi.org/10.1016/S0016-0032\(36\)90524-0](https://doi.org/10.1016/S0016-0032(36)90524-0).
21. NEUGEBAUER, H. E. J., *Die Theoretischen Grundlagen des Mehrfarbenbuchdrucks*. 4, s.l. : Zeitschrift fur Wissenschaftliche Photographie Photophysik und Photochemie, 1937, Vol. 36.
22. PETRUCCI, A. *Bollettino d'Arte - Di Ugo da Carpi e del "Chiaroscuro" Italiano*. Roma : Ministero dei Beni Culturali, 1932, Vol. VI.
23. REINHARD, E., et al. *Color Imaging - Fundamentals and Applications*. s.l. : A K Peters / CRC Press, 2008. ISBN-13 : 978-1568813448.
24. Roman16 BVDM Reference Images. [Online] BVDM Bundesverband Druck und Medien e.V. [Cited: 10 12 2021.] <https://www.bvdm-online.de/themen/technik-forschung/standardwerke/roman16-english/>.
25. SCHIRMER, K. H. *Untersuchung über Farbtonänderungen von Druckfarben - Die auf Grau abgestimmte Farbwiedergabe im Dreifarbenbuchdruck*. München : Deutsche Gesellschaft Für Forschung Im Graphischen Gewerbe e.v., 1955.
26. TR 015-2015 — Graphic technology — Methodology for Establishing Printing Aims Based on a Shared Near-neutral Gray-scale. NPES/ANSI, 2015. CGATS/IDEAlliance TR 015-2015.
27. Ugo da Carpi. [Online] Wikipedia, 4 3 2021. [Cited: 18 9 2021.] [https://en.wikipedia.org/wiki/Ugo\\_da\\_Carpi](https://en.wikipedia.org/wiki/Ugo_da_Carpi).
28. What Is G7. [Online] IdeAlliance, N/A. [Cited: 2021 9 18.] <https://connect.idealliance.org/g7/about/whatisg7>.
29. WYSZECKI G., STILES W. S. *Color Science*. s.l. : Wiley, 1982. ISBN 0-471-39918-3.
30. YULES, J. *Four Color Processes and the Black Printer. Journal of the Optical Society of America*. 1940.

# Allegati

## Allegato A: Termini e Definizioni

**NOTA: Mantenuto in lingua Inglese come nel documento originale**

### 1. CHARACTERIZATION

Relationship between input/output device-dependent and device-independent values. (ISO 12637-2:2008 Graphic Technology - Vocabulary - Part 2: Prepress terms, 2008)

### 2. CIELAB COLOUR SPACE

Rectangular opponent-type colour space derived from non-linear transformations of the 1931 CIE XYZ system and expressed by the colour coordinates  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  approximately uniform with respect to colour differences, where  $L^*$  represents relative lightness,  $a^*$  represents redness or greenness and  $b^*$  represents yellowness or blueness. (ISO 12637-2:2008 Graphic Technology - Vocabulary - Part 2: Prepress terms, 2008)

### 3. CIE STANDARD ILLUMINANTS

Illuminants A, D50, D65, etc., defined by the CIE in terms of relative spectral power distribution. (ISO 12637-2:2008 Graphic Technology - Vocabulary - Part 2: Prepress terms, 2008)

### 4. COLOUR CHARACTERIZATION TARGET

Standard colour reference used for establishing the relationship between a printed image and the input values of that image. (ISO 12637-2:2008 Graphic Technology - Vocabulary - Part 2: Prepress terms, 2008)

### 5. COLOUR SEPARATION

Act of separation by which a multi-coloured original is split into the separate colour files or films associated with the printing colorants for process colour printing. (ISO 12637-2:2008 Graphic Technology - Vocabulary - Part 2: Prepress terms, 2008)

### 6. COLOUR SPACE

Geometric representation of colours in space, usually of three dimensions (ISO 12637-2:2008 Graphic Technology - Vocabulary - Part 2: Prepress terms, 2008)

### 7. CONTINUOUS TONE

Image that has not been screened and has infinite tone gradations between the lightest highlights and the deepest shadows. (ISO 12637-2:2008 Graphic Technology - Vocabulary - Part 2: Prepress terms, 2008)

### 8. CONTRAST

- Subject contrast refers to relative difference between the amount of light reflected by the "highlights," or bright areas, of the subject and the "shadows," or darker areas. This difference is measured with a reflected-light meter. (Johnson, 2007)
- Print contrast (also called tonal separation) is the ability of the film and printing paper to render a visual distinction between close tonal values. (Johnson, 2007)
- Relationship or degree of tonal gradation between the lightest and darkest area in a original or reproduction (ISO 12637-2:2008 Graphic Technology - Vocabulary - Part 2: Prepress terms, 2008)

9. CONTROL PATCH

Area produced for control measurement purposes. (ISO 12637-2:2008 Graphic Technology - Vocabulary - Part 2: Prepress terms, 2008)

10. CONTROL STRIP

Array of control patches. (ISO 12637-2:2008 Graphic Technology - Vocabulary - Part 2: Prepress terms, 2008)

11. DENSITY

Weight of tone or colour in any image, measurable by a densitometer. (ISO 12637-2:2008 Graphic Technology - Vocabulary - Part 2: Prepress terms, 2008)

12. DOT PERCENTAGE

Percentage of an area covered by half-tone dots of each colour, ranging from 0 % to 100 % (ISO 12637-2:2008 Graphic Technology - Vocabulary - Part 2: Prepress terms, 2008)

13. GREY COMPONENT REPLACEMENT (GCR)

Removing appropriate amounts of individual colorants that together are equal to grey and replacing these multiple colorants with an appropriate amount of black. (ISO 12637-2:2008 Graphic Technology - Vocabulary - Part 2: Prepress terms, 2008)

14. GREY BALANCE

Set of tone values for cyan, magenta and yellow that are expected to appear as an achromatic grey under specified viewing conditions when printed using the specified printing conditions.

15. GREY REPRODUCTION

Set of colorimetric values of the print that appears as an achromatic colour under specified viewing conditions if printed under specified printing conditions to be used for process control. (ISO 12647-1:2013 Graphic Technology - Process control for the production of half-tone colour separations, proof and production prints — Part 1: Parameters and measurement methods, 2013; Barrett, 2008)

16. GREY SCALE

Series of grey levels between white and black.

17. GRADATION

Staged change in tones from highlight to shadow. (ISO 12637-2:2008 Graphic Technology - Vocabulary - Part 2: Prepress terms, 2008)

18. HALF-TONE

Image composed of dots which can vary in screen ruling (number per centimetre), size, shape, or density, thereby producing tonal gradations. (ISO 12637-2:2008 Graphic Technology - Vocabulary - Part 2: Prepress terms, 2008)

19. LINE ART

Image that has no tonal gradation. (ISO 12637-2:2008 Graphic Technology - Vocabulary - Part 2: Prepress terms, 2008)

20. MEDIUM BLACK POINT

Lowest luminance neutral that can be produced by an imaging medium in normal use, measured using the specified measurement geometry. (ISO 12637-2:2008 Graphic Technology - Vocabulary - Part 2: Prepress terms, 2008)

21. MEDIUM WHITE POINT

Neutral colour with the highest luminance that can be produced by an imaging medium in normal use, measured using the specified measurement geometry. (ISO 12637-2:2008 Graphic Technology - Vocabulary - Part 2: Prepress terms, 2008)

22. MID-TONE BALANCE CONTROL PATCH

Half-tone control patch, containing all three chromatic process inks, used for assessing the balance between the inks in which the cyan tone value is normally in the range between 40 and 60 and the magenta and yellow tone values are selected to approximate an achromatic colour. (ISO 12637-2:2008 Graphic Technology - Vocabulary - Part 2: Prepress terms, 2008)

23. PRIMARY COLOUR

Unitary colours from which all other colours are created (in additive and subtractive colour theory). (ISO 12637-2:2008 Graphic Technology - Vocabulary - Part 2: Prepress terms, 2008)

24. SECONDARY COLOUR

Colour produced by the mixture (either additive or subtractive) of two primary colours. (ISO 12637-2:2008 Graphic Technology - Vocabulary - Part 2: Prepress terms, 2008)

25. TONE

Degree of lightness or darkness in any given area of an image. (ISO 12637-2:2008 Graphic Technology - Vocabulary - Part 2: Prepress terms, 2008)

26. TONE VALUE (TV)

Proportional printing value encoded in a data file and interpreted as defined in the file format specification. (ISO 12637-2:2008 Graphic Technology - Vocabulary - Part 2: Prepress terms, 2008)

27. TONE VALUE INCREASE (TVI) - ALSO CALLED DOT GAIN

Difference between a tone value on the print and the tone value on the half-tone film or in the digital data file. (ISO 12637-2:2008 Graphic Technology - Vocabulary - Part 2: Prepress terms, 2008)

28. UNDER COLOUR REMOVAL (UCR)

Removing appropriate amounts of individual colorants that together are equal to black and replacing them with an appropriate amount of black. (ISO 12637-2:2008 Graphic Technology - Vocabulary - Part 2: Prepress terms, 2008)

## Allegato B: Curriculum Vitae

Terminato il Diploma Tecnico in Informatica Industriale nei primi anni '90, ho avuto l'opportunità di seguire l'evoluzione delle applicazioni multimediali dai primi dispositivi commerciali, come sviluppatore Commodore CDTV e Philips CD-I, alle applicazioni 3D e VR su PC con Microsoft Windows qualche anno dopo. Nel 1995 ho co-fondato una software house che ha creato software di colorimetria per le industrie di vernici, acquisita successivamente da Datacolor Inc., USA. Nel 2003 ho iniziato un'attività di consulenza per la standardizzazione e la certificazione dei processi di stampa, e software custom per flussi di lavoro per industrie primarie come Tetra Pak (Svezia), GlaxoSmithKline (UK), UTECO (Italia), Ricoh (Italia), Konica Minolta (Italia, Svizzera, Giappone), Canon (Italia), Komori (Italia), SACMI (Italia), e Jet-Set CEFLA (Italia). Nel 2017 mi sono trasferito a Sant Cugat (Barcellona) e sono entrato in HP Inc. come Program Manager e Ingegnere di Ricerca e Sviluppo, focalizzato sui processi di qualità del colore e dell'immagine. Fornisco il mio contributo alla comunità di standardizzazione nel comitato ISO/TC130 "Graphic Technology" dal 2009, prima come capo delegazione italiana, ora in rappresentanza della Spagna. Sono anche membro dell'ICC International Colour Consortium in rappresentanza di HP Inc. Sono stato membro di IEEE per molti anni e già Presidente di TAGA Italia.